I+I

# CANMET

REVUE QUINQUENNALE DU PROJET
DE RECHERCHE CONJOINT
CANADA-ONTARIO-INDUSTRIE
SUR LES COUPS DE TOIT

SP90-4F

L'ENERGIE DE NOS RESSOURCES NOTRE FORCE CREATRICE

THE ENERGY OF OUR RESOURCES THE POWER OF OUR IDEAS

91-05145/

# Revue quinquennale du projet de recherche conjoint Canada–Ontario–industrie sur les coups de toit

D.G.F. Hedley
Laboratoires de recherche minière

45pp

Rapport spécial de CANMET SP90-4F

MICROMEDIA

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Groupe Communication Canada — Édition
Ottawa, Canada K1A 0S9

N° de catalogue M38-15/90-4F
ISBN 0-660-93327-6

# Avant-propos

Le Projet de recherche conjoint Canada–Ontario–industrie sur les coups de toit a été entrepris en 1984 pour faire face à la réapparition du grave problème des coups de toit dans certaines mines ontariennes. Il s'agit probablement du premier grand projet de recherche minière réalisé sur une base tripartite au Canada. Faisant appel à la collaboration de l'industrie minière d'une province et de deux paliers de gouvernement, ce projet a été présenté comme un modèle de projet de collaboration. Les Laboratoires de recherche minière de CANMET sont fiers du rôle qu'ils ont joué dans ce projet.

Dans le présent rapport spécial de CANMET, David Hedley, chef du projet sur les coups de toit, passe en revue les réalisations des cinq premières années du projet, soit de 1984 à 1989. En voici un résumé :

- L'industrie minière a augmenté le nombre de systèmes de surveillance microsismique dans certaines mines, nombre qui est passé de trois, en 1984, à seize en 1989. On en a installé dans toutes les mines ontariennes où cela a été jugé nécessaire.

- Pour compléter le réseau sismique de l'est du Canada mis en place par la Commission géologique du Canada, on a installé des stations sismographiques à Red Lake, Elliot Lake, Sudbury et Kirkland Lake. On a, par conséquent, amélioré à la fois le temps de réponse et la précision de localisation des événements.

- Des systèmes macrosismiques, de niveau intermédiaire par rapport à ceux qui ont été mentionnés ci–dessus, ont été conçus et installés dans les mines Quirke (Rio Algom), Strathcona (Falconbridge), Macassa (Lac Minerals), Campbell Red Lake (Placer Dome) et Creighton (Inco). Ces systèmes, qui enregistrent les formes d'ondes, produisent des données qui peuvent être utilisées pour déterminer les mécanismes d'origine et les paramètres du foyer.

- On a mis à l'essai des techniques de sautage pour libérer les contraintes et on a utilisé des remblais rigides pour réduire et éliminer les coups de toit. Les systèmes de soutènement servant à limiter les dommages dus aux coups de toit ont été évalués, et des modèles numériques ont été appliqués pour déterminer la stabilité de réseaux locaux de failles.

En 1990, les causes et les effets des coups de toit sont beaucoup mieux connus que dans le passé. La conception des mines est devenue un processus très complexe faisant couramment appel à des concepts géomécaniques.

Durant la première étape du projet, on a surtout mis l'accent sur l'amélioration des capacités de surveillance dans les mines ontariennes et sur la précision de localisation des événements sismiques. Durant la deuxième étape, on poursuivra l'étude des causes fondamentales des coups de toit et l'élaboration de méthodes permettant de les atténuer et de limiter leurs dommages.

Les Laboratoires de recherche minière de CANMET espèrent continuer de participer à ce projet clé.

John E. Udd
Directeur
Laboratoires de recherche minière
CANMET

# Table des matières


Avant-propos ..... i
Historique ..... 1
Sismicité dans les mines ontariennes ..... 3
Systèmes de surveillance sismique ..... 5
Effets d'échelle ..... 9
Analyse photographique des coups de toit dans les mines ontariennes ..... 14
Mines d'Elliot Lake ..... 19
Rio Algom Limitée ..... 19
Denison Mines Limited ..... 20
Mines de Kirkland Lake ..... 22
Lac Minerals Ltd. ..... 22
Mines de Red Lake ..... 25
Placer Dome Inc. ..... 25
Mines de Sudbury ..... 27
Falconbridge Limitée ..... 27
Inco Limitée ..... 30
Bibliographie ..... 35
Comité de gestion du projet sur les coups de toit ..... 39
Comité technique du projet sur les coups de toit ..... 39
Autres membres du personnel participant au projet ..... 39
Comité technique ..... 39
CANMET ..... 39


## Tableaux


1. Répartition des événements par camp minier ..... 3
2. Répartition des événements sismiques par mine, de 1984 à 1989 ..... 4


## Figures


1. Coups de toit signalés et accidents mortels associés dans les mines ontariennes (1928 à 1989) ..... 1
2. Distribution des événements sismiques par magnitude dans les mines ontariennes (1984 à 1989) ..... 5
3. Emplacement des stations sismographiques dans le nord de l'Ontario ..... 6
4. Réseau sismographique autour du bassin de Sudbury ..... 7
5a. Forme d'onde sismique typique enregistrée sur un système macrosismique ..... 8
5b. Analyse d'un signal sismique dans le domaine des fréquences ..... 8
6. Représentation de l'activité sismique après un coup de toit de magnitude 3,6 (Mine Creighton) ..... 9

7. Relation entre l'énergie sismique et les magnitudes dans les mines ontariennes ..... 10
8. Relation entre le moment sismique et la magnitude dans les mines ontariennes ..... 11
9. Vitesse maximale des particules en fonction d'une distance étalonnée dans les mines ontariennes ..... 12
10. Accélération maximale des particules en fonction d'une distance étalonnée dans les mines ontariennes ..... 12
11. Libération temporelle de l'énergie sismique dans les mines Quirke, Creighton et Strathcona ..... 13
12. Plan de la mine Quirke indiquant les emplacements des coups de toit, de 1984 à 1989 .... 19
13. Problèmes rencontrés au cours du forage de deux trous au-dessus de la zone des coups de toit à la mine Quirke ..... 20
14. Plan de la mine Denison figurant les emplacements des événements sismiques dans la zone de piliers périmétriques en 1989 ..... 21
15. Plan de la partie est de la mine Denison figurant l'étendue de l'activité sismique, de 1987 à 1989 ..... 22
16. Points d'activité microsismique après le sautage de libération des contraintes d'un stot à la mine Macassa ..... 23
17. Nouveaux plans d'abattage avec remblais cimentés à la mine Macassa (d'après W. Quesnel *et al.*, 1989) ..... 24
18. Analyse des contraintes exercées sur les stots à la mine Campbell, et de leur résistance .... 26
19. Vitesse maximale des particules et force appliquée sur différents types de soutènement soumis à des coups de toit ..... 27
20. Vue longitudinale en élévation de la mine Strathcona montrant les principales structures, les zones remblayées et les panneaux à abattre (d'après Davidge, 1987) ..... 28
21. Déplacement du cisaillement lié à l'abattage dans la mine Strathcona (d'après Brady, 1988) ..... 29
22. Disposition des trous de libération des contraintes dans les galeries et piliers (Mine Creighton) ..... 31
23. Fente de libération des contraintes dans un stot au-dessous du niveau 6 600 à la mine Creighton et points de localisation de l'activité sismique ..... 32
24. Localisation des zones faillées sismiquement actives à la mine Creighton ..... 32
25. Coupe longitudinale de la mine Copper Cliff North montrant les chambres abattues et remblayées (d'après Morrison, 1990) ..... 33

## Photographies

Dommages causés à une galerie sur le niveau 6 600 de la mine Creighton, par un coup de toit de 3,6 Mn à environ 25 m de distance ..... 14
Stot à la mine Campbell Red Lake ayant subi une libération de contraintes avant d'être abattu par longue taille ..... 14
Déplacement de la voie causé par coulissage de faille au puits n° 5 de la Falconbridge ..... 15
Un coup de toit a endommagé une galerie soutenue par des poteaux et des poutres de bois à la mine Macassa ..... 15

Plus de 800 tonnes de roche ont été déplacées par suite de deux petits coups de toit (2,0 Mn) dans une galerie de halage isolée dans la mine Strathcona ..... 16
Écaillage d'un pilier de séparation dans la zone ayant subi un coup de toit dans la partie sud de la mine Denison ..... 16
Entrelacement de câbles agrafés à la mine Strathcona ..... 17
Dommages causés par un coup de toit de 3,1 Mn à la mine Macassa ..... 17
Dommages causés à une galerie de sole à la mine Quirke ..... 18
Remblai répandu autour d'un pilier fracturé à la mine Denison ..... 18

# Historique

C'est au début des années 30 que les premiers coups de toit ont éclaté dans les mines ontariennes, principalement dans les mines d'or de Kirkland Lake et dans certaines mines de nickel de Sudbury. Les coups de toit signalés par le ministère du Travail de l'Ontario et les accidents mortels associés sont présentés à la figure 1.

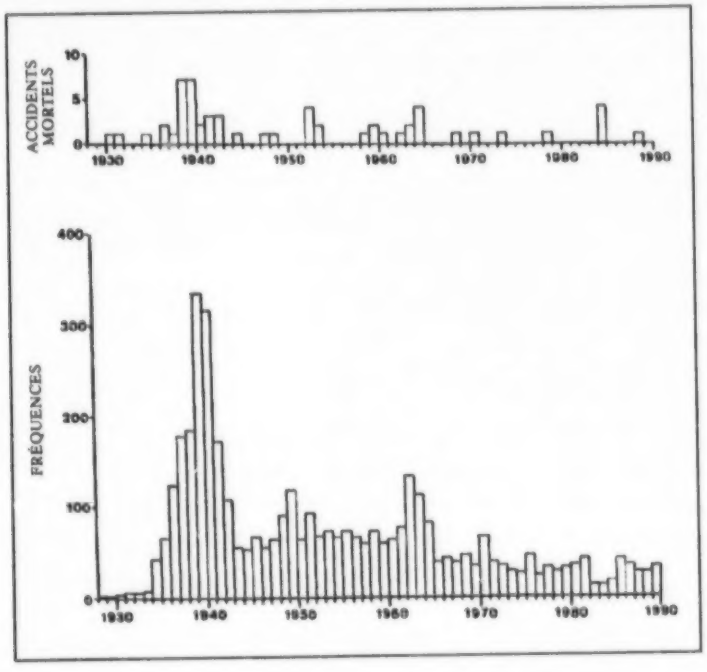



Figure 1 – Coups de toit signalés et accidents mortels associés dans les mines ontariennes (1928 à 1989)

Avant la fin de 1930, cependant, les coups de toit et les accidents mortels qui s'ensuivirent avaient commencé à s'accroître de façon alarmante. L'industrie minière a alors entrepris des travaux de recherche importants pour élaborer des méthodes permettant de régler ce problème. En 1940, l'Ontario Mining Association a chargé la commission d'enquête Morrison d'analyser le problème. Celle-ci recommanda, entre autres, en se basant sur des observations, des expériences et des essais, d'éviter les piliers résiduels, de recourir à l'extraction systématique en séquence et d'élaborer des méthodes d'exploitation autour des dykes et des failles. Après application, ces méthodes se sont avérées partiellement concluantes et la fréquence des coups de toit a diminué.

Avant les années 1980, les coups de toit dans les mines ontariennes étaient relativement peu nombreux. Il y a eu, cependant, une exception notable en 1964 lorsqu'une série de coups de toit importants a causé la fermeture de la mine Wright-Hargreaves à Kirkland Lake.

Durant les années 1980, toutefois, les coups de toit dans les mines ontariennes ont augmenté considérablement. Quatorze mines à Red Lake, Elliot Lake, Sudbury et Kirkland Lake ont été affectées.

Leur caractéristique particulière était leur multiplicité, car, antérieurement, les coups de toit avaient surtout été des phénomènes isolés suivis d'une certaine activité microsismique.

Des séquences de coups de toit multiples ont été enregistrées pour la première fois à la mine Quirke de la Rio Algom à Elliot Lake en 1982, et par la suite à la mine Campbell de la Placer Dome à Red Lake en 1983. L'année suivante, 1984, a été une année particulièrement mouvementée. D'abord, une série de coups de toit au puits n° 5 de la Falconbridge a causé quatre accidents mortels et la fermeture de la mine. Quelques semaines plus tard, un coup de toit de magnitude 4,0 s'est produit à la mine Creighton de l'Inco et a secoué toute la ville de Sudbury. Enfin, de nouveaux coups de toit ont ébranlé la mine Quirke et, sur une période de huit mois, on a enregistré sur le réseau sismique régional 120 coups de toit de magnitude dépassant 3,5.

Ce grand nombre de coups de toit sur une courte période de temps et dans quatre mines différentes de la province n'a pas manqué d'attirer l'attention du public, des médias, de l'industrie minière, de syndicats et d'organismes gouvernementaux. Le ministère du Travail de l'Ontario a chargé une commission d'enquêter sur le contrôle des terrains et les conditions d'urgence dans les mines ontariennes.

C'est par suite de l'augmentation des coups de toit qu'a été mis sur pied, en 1985, le Projet de recherche conjoint Canada–Ontario–industrie sur les coups de toit. Le gouvernement du Canada, par l'intermédiaire du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), a prêté le personnel nécessaire à la mise en oeuvre du projet. Le gouvernement de l'Ontario, par l'intermédiaire du ministère du Développement du Nord et des Mines et du ministère du Travail, a financé l'achat d'équipements et de services. L'industrie minière de l'Ontario, par l'intermédiaire des sociétés Denison Mines Limited, Falconbridge Limitée, Inco Limitée, Lac Minerals Ltd., Placer Dome Inc. et Rio Algom Limitée, a offert accès à ses systèmes de surveillance microsismique, a participé à l'installation et à l'exploitation de nouveaux équipements, a fourni des données sur les coups de toit et a réalisé sur place des essais sur divers aspects d'atténuation et ou d'élimination des coups de toit.

La raison d'être et les objectifs du projet sur les coups de toit visaient avant tout de mettre au point de nouveaux systèmes de surveillance sismique permettant de capter les formes d'ondes complètes et d'analyser ensuite les causes et les mécanismes des coups de toit par l'utilisation de techniques améliorées de localisation des sources, l'étude des mouvements premiers, l'analyse de la vitesse maximale des particules, de l'énergie sismique libérée par les coups de toit et de leur fréquence spectrale. Ces techniques devaient ensuite être combinées à des essais sur le terrain pour évaluer les méthodes d'atténuation des coups de toit ou limiter leurs dommages ou les prévoir.

Pendant le projet quinquennal, on a mis en place des stations sismographiques à Red Lake, Elliot Lake, Sudbury et Kirkland Lake pour enregistrer les coups de toit importants et déterminer leur magnitude. Des systèmes macrosismiques ont été mis en place à la mine Quirke (Rio Algom), à la mine Strathcona (Falconbridge), à la mine Macassa (Lac Minerals), à la mine Campbell (Placer Dome) et à la mine Creighton (Inco). Ces systèmes enregistrent les formes d'ondes sismiques et permettent de déterminer les mécanismes des coups de toit et les paramètres au foyer. L'industrie minière ontarienne a augmenté le nombre des systèmes de surveillance microsismique dans ses mines, les faisant passer de 3 à 16, afin de localiser les événements sismiques.

Dans les mines Campbell et Macassa, on a réalisé des essais de sautage pour libérer les contraintes dans des stots et des piliers de sole. À la mine Creighton, on a mis à l'essai une fente de relaxation des contraintes dans un gros stot entre des niveaux. À la Falconbridge, on a analysé la stabilité de réseaux de failles en ayant recours à des techniques de modélisation numérique. L'emploi de remblais rigides pour limiter les dommages des coups de toit a été adopté à la mine Macassa et l'on a eu recours à des remblais, à la mine

Denison, pour contrer les ruptures violentes de piliers. L'Inco, la Falconbridge et la Placer Dome ont toutes testé des systèmes de soutènement de type coulissant pour limiter les dommages des coups de toit.

## Sismicité dans les mines ontariennes

Depuis 1984, les événements sismiques provoqués par l'exploitation minière, notamment les coups de toit, ont été classifiés selon leur magnitude. Un coup de toit est défini comme un événement sismique qui endommage l'équipement ou déplace plus de cinq tonnes de roche. Au cours des ans, le nombre d'événements sismiques enregistrés a été, la plupart du temps, plus élevé que le nombre de coups de toit signalés.

Les magnitudes sont déterminées à partir du Réseau sismique de l'est du Canada, exploité par la Division de géophysique de la Commission géologique du Canada. L'échelle des magnitudes est celle de Nuttli. Cette échelle ne s'applique qu'à l'est de l'Amérique du Nord, mais elle est semblable, par de nombreux aspects, à l'échelle de Richter utilisée ailleurs. Dans la plupart des camps miniers du Nord ontarien, le niveau de détection est un événement de magnitude d'au moins 2,0. En 1985, le Service sismologique de la Commission géologique du Canada a commencé à publier un rapport trimestriel sur *L'activité sismique liée à l'exploitation minière au Canada*, qui présente une liste de tous les événements enregistrés par ses stations sismographiques.

Le tableau 1 indique le nombre d'événements sismiques liés à l'exploitation minière dont la magnitude est d'au moins 2,0, par camp minier, pour les années allant de 1984 à 1989. Le tableau 2 donne le nombre d'événements à chaque mine et la plus forte magnitude enregistrée. Au cours de cette période de six ans, ce sont les mines d'Elliot Lake et de Sudbury qui ont été les plus affectées, 40 % et 46 % respectivement des 367 événements sismiques enregistrés. La plupart des événements sismiques à Elliot Lake sont survenus en 1984 et 1985; par la suite, leur nombre a rapidement diminué. À Sudbury, le nombre d'événements a eu tendance à être plus constant qu'ailleurs, sauf en 1989, année au cours de laquelle l'activité sismique dans la province a été relativement faible.

Tableau 1 – Répartition des événements par camp minier

| Camp minier | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Red Lake | 18 | 3 | 6 | 0 | 0 | 0 | 27 |
| Elliot Lake | 46 | 74 | 13 | 8 | 1 | 4 | 146 |
| Sudbury | 15 | 20 | 35 | 56 | 36 | 10 | 172 |
| Kirkland Lake | 5 | 2 | 3 | 3 | 5 | 2 | 20 |
| Timmins | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| Total | 84 | 99 | 57 | 67 | 42 | 19 | 368 |

Tableau 2 – Répartition des événements sismiques par mine, de 1984 à 1989

| Endroit | Nombre | Magnitude la plus élevée | Endroit | Nombre | Magnitude la plus élevée |
|---|---|---|---|---|---|
| SUDBURY | | | RED LAKE | | |
| Falconbridge | 7 | 3,5 | Campbell | 23 | 3,3 |
| Fraser | 2 | 2,5 | Dickenson | 4 | 2,1 |
| Lockerby | 5 | 2,8 | ELLIOT LAKE | | |
| Strathcona | 46 | 3,2 | Denison | 11 | 2,8 |
| Copper Cliff North | 23 | 3,3 | Quirke | 135 | 3,5 |
| Creighton | 60 | 4,0 | KIRKLAND LAKE | | |
| Frood–Stobie | 2 | 2,9 | Kerr Addison | 3 | 3,3 |
| Levack | 5 | 2,6 | Macassa | 14 | 3,1 |
| Stobie | 1 | 2,4 | | | |

La mine la plus active sismiquement a été la mine Quirke à Elliot Lake, suivie des mines Creighton et Strathcona à Sudbury. Les autres mines ébranlées par plus de dix événements de magnitude d'au moins 2,0 sont la mine Copper Cliff North à Sudbury, les mines Campbell à Red Lake, Denison à Elliot Lake et Macassa à Kirkland Lake.

La distribution des fréquences des événements sismiques par magnitude est présentée à la figure 2. Comme prévu, les petits événements sont beaucoup plus nombreux que les gros événements. La distribution peut être divisée en trois grands groupes :

- les événements dont la magnitude se situe entre 2,0 et 2,4 comptent pour 65 % du nombre total, et les dommages associés à ces événements sont habituellement peu importants, ne comportant que des déplacements de roche de quelques tonnes;
- les événements dont la magnitude se situe entre 2,5 et 2,9 s'élèvent à 30 % du nombre total, et ils peuvent causer plus de dommages, soit des déplacements de 10 tonnes de roche;
- les événements dont la magnitude dépasse 3,0 ne correspondent qu'à 5 % du nombre total, mais les dommages sont plus sérieux, entraînant habituellement des déplacements de centaines et même de milliers de tonnes de roche.

Au cours de la période de six ans, ces événements ont atteint une magnitude moyenne de 3,5 par année dans les mines ontariennes.

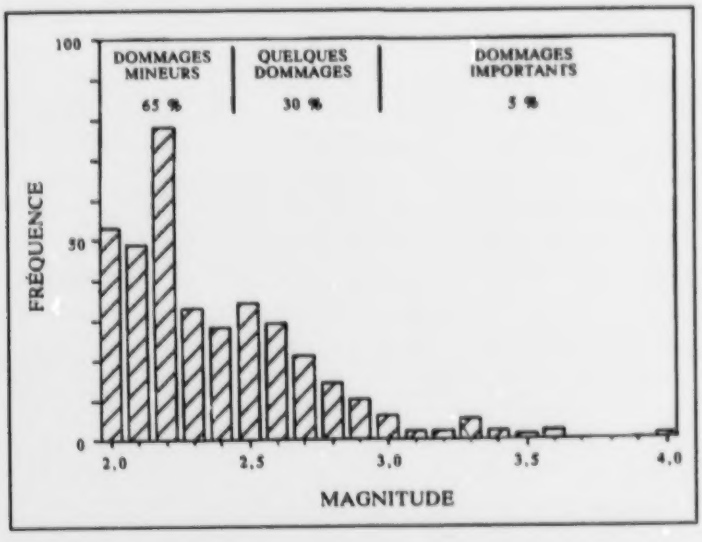



Figure 2 – Distribution des événements sismiques par magnitude dans les mines ontariennes (1984 à 1989)

Au cours du projet quinquennal, il s'est dégagé certaines tendances caractéristiques de l'activité sismique dans les différents camps miniers. Dans les mines de Red Lake, d'Elliot Lake et de Kirkland Lake, la grande partie de l'activité sismique se manifeste dans les piliers découpés dans le massif minéralisé. La cause et le mécanisme semblent être la surcharge des piliers, suivie de leur rupture violente. Dans les mines de Sudbury, la plupart des événements de forte magnitude ont eu lieu à l'extérieur du massif minéralisé sur des structures géologiques. Le mécanisme semble être un coulissage de compartiments de failles, comme dans le cas des séismes.

Les événements sismiques dans les mines d'Elliot Lake et la plupart des événements survenus dans les mines de Red Lake sont localisés dans d'anciennes zones exploitées selon des méthodes minières du passé. Dans les mines de Sudbury et de Kirkland Lake, les événements ont tendance à se produire près des chantiers actuels exploités selon les méthodes d'aujourd'hui.

On a relevé un certain nombre de mécanismes de déclenchement. Ce sont notamment la proximité des sautages, les travaux de restauration comportant un purgeage et un boulonnage, l'extraction de minerais fragmentés d'un chantier, les venues d'eau de surface ou d'eau de drainage des remblais et les variations de la température ou de la pression de l'air.

## Systèmes de surveillance sismique

Lorsque le projet sur les coups de toit a débuté en 1985, trois systèmes microsismiques étaient exploités dans les mines ontariennes ainsi qu'une installation sismographique à Sudbury. À la fin de la première étape de cinq ans du projet, 16 systèmes microsismiques ainsi que quatre systèmes macrosismiques étaient exploités, et l'on avait installé dans les camps miniers de l'Ontario cinq stations sismographiques supplémentaires.

L'envergure de cette couverture est comparable à celle des districts miniers aurifères du Witwatersrand en Afrique du Sud.

Comme on l'a déjà mentionné, la Division de géophysique de la Commission géologique du Canada exploite le Réseau sismique de l'est du Canada. On s'en sert pour calculer la magnitude des événements et, dans le cas des événements de très forte magnitude, les paramètres du foyer. Les emplacements des stations sismographiques en Ontario et à proximité sont indiqués à la figure 3. Ce réseau a été élargi par l'ajout de stations sismographiques à Sudbury, Elliot Lake, Red Lake et Kirkland Lake. Le plus complexe d'entre eux est celui de Sudbury, comportant trois stations situées en bordure du bassin (figure 4). Les signaux de chaque station sont transmis en continu par ligne téléphonique dédiée à une installation informatique et d'affichage située à Science North, centre scientifique public de Sudbury. À partir de là, les signaux de ces trois stations sont acheminés en continu à la Division de géophysique à Ottawa. CANMET a affecté une personne à Ottawa pour s'occuper du réseau de Sudbury et discriminer les sautages et les événements sismiques causés par l'exploitation. En général, 200 événements sont enregistrés mensuellement, dont 60 % sont liés à des sautages et 12 % à des événements causés par l'exploitation dans les mines de Sudbury. Les 28 % restants sont des événements se produisant à l'extérieur du bassin de Sudbury, que ce soit des séismes naturels ou des événements causés par l'exploitation, y compris les sautages.

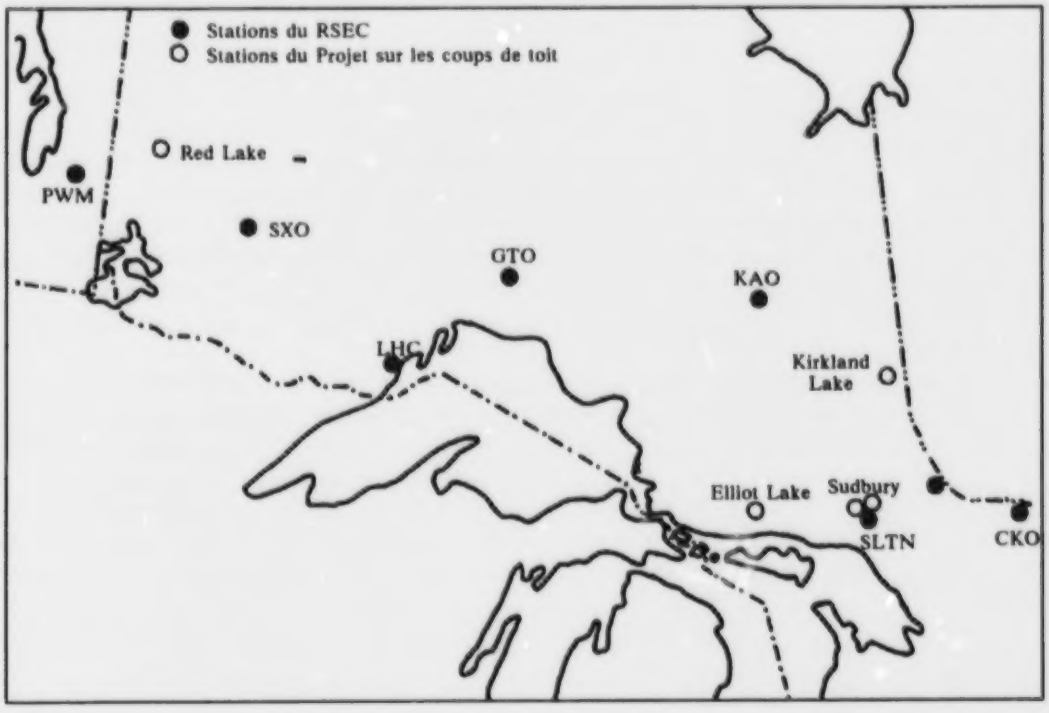



Figure 3 – Emplacement des stations sismographiques dans le nord de l'Ontario

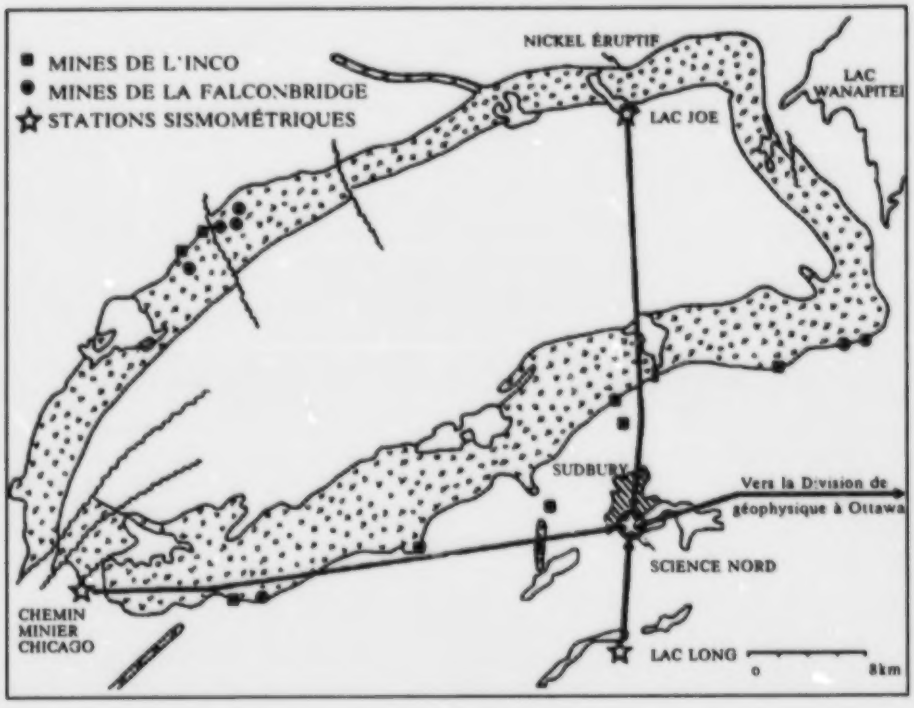



Figure 4 – Réseau sismographique autour du bassin de Sudbury

Le premier système macrosismique, conçu sous contrat par la Noranda Inc., a été installé dans la mine Quirke en 1987, et par la suite dans les mines Strathcona, Macassa, Campbell et Creighton. Chaque système est composé de cinq capteurs triaxiaux insérés dans des trous forés à la surface ou sous terre. Pour éviter la saturation des capteurs, on les a habituellement installés à une distance variant entre 0,5 à 1,0 km des travaux miniers en cours. Le système de Strathcona est doté d'accéléromètres tandis que les quatre autres systèmes sont dotés de vélocimètres. Les systèmes macrosismiques enregistrent habituellement les signaux dans la bande de fréquence de 10 à 300 Hz et ils peuvent détecter les événements sismiques dont la magnitude est de 0,5 et plus.

Ces systèmes macrosismiques enregistrent les formes d'ondes complètes (en général d'une durée de deux secondes) des événements sismiques. Un exemple de signal de vitesse est présenté à la figure 5a. Dans le domaine temporel, l'arrivée des ondes P et S peut habituellement être différenciée. La différence de temps est liée à la distance entre l'événement et le capteur; avec un réseau de cinq capteurs, on peut localiser l'événement. L'arrivée de l'onde P indique en outre un mouvement premier qui se dirige vers le capteur ou s'en éloigne, fournissant des informations sur le mécanisme de l'événement sismique. La vitesse maximale des particules (VMP) sert à évaluer les dommages possibles d'un coup de toit. L'intégration du signal de la vitesse au carré donne l'énergie sismique libérée.

L'analyse des mêmes données sismiques dans le domaine des fréquences est présentée à la figure 5b. La densité spectrale forme un plateau aux basses fréquences et diminue rapidement aux hautes fréquences. Le plateau est lié au moment sismique qui est une autre mesure de la magnitude d'un coup de toit. L'intersection du plateau et de la pente de décroissance est la fréquence–coin laquelle est liée à la superficie du coulissage.

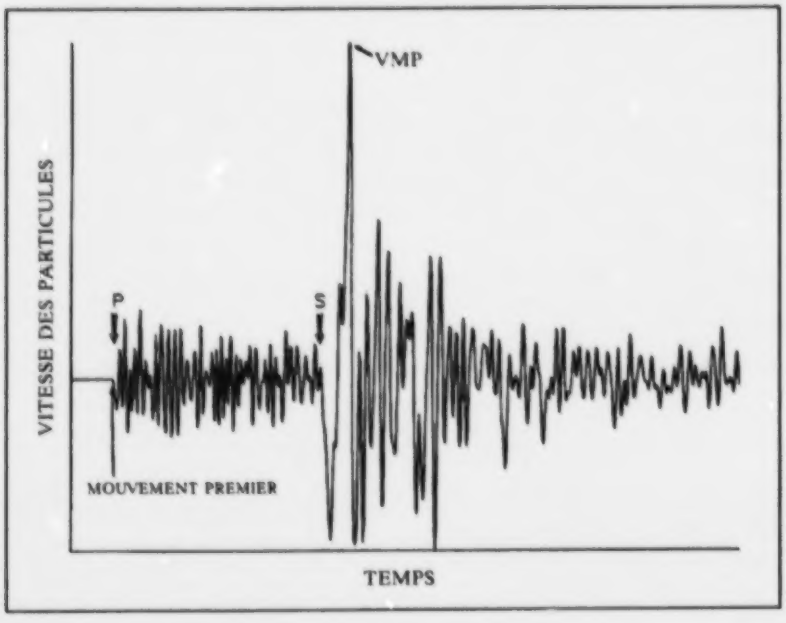



Figure 5a – Forme d'onde sismique typique enregistrée sur un système macrosismique

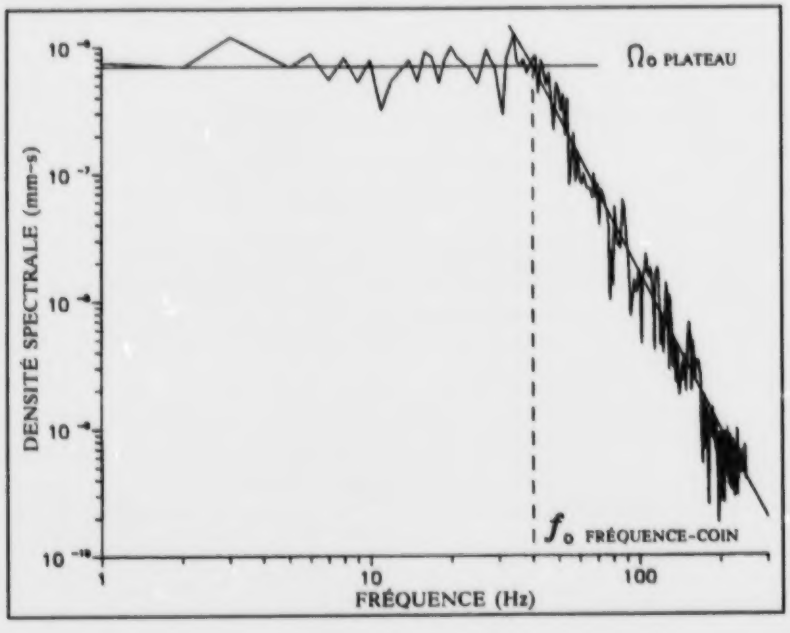



Figure 5b – Analyse d'un signal sismique dans le domaine des fréquences

Deux types de systèmes microsismiques sont actuellement utilisés dans les mines ontariennes : le système Electrolab MP-250 et un système conçu à l'université Queen's. Le système Electrolab comporte jusqu'à 64 capteurs installés autour du chantier souterrain et enregistre les temps d'arrivée aux différents capteurs lorsque le signal sismique dépasse une valeur seuil. À partir des temps d'arrivée, on peut localiser l'événement sismique. Un seul capteur joue le rôle de canal d'énergie et le signal en provenance de ce capteur est intégré afin d'obtenir une valeur comparative de l'énergie sismique. Dans le système de l'université Queen's, les formes d'ondes sismiques complètes sont enregistrées, ce qui permet de déterminer avec précision l'arrivée de l'onde P plutôt qu'une valeur seuil. Le système de l'Université Queen's peut, comme les systèmes macrosismiques, être utilisé pour analyser les formes d'ondes, mais seulement celles des petits événements étant donné que les capteurs sont très sensibles et qu'ils sont saturés par les événements de forte magnitude.

La plupart des sociétés minières ont numérisé leurs plans de mine et peuvent reporter automatiquement l'activité sismique sur des plans et des coupes. À titre d'exemple, prenons la figure 6, qui montre l'activité sismique après un coup de toit de magnitude 3,6 à la mine Creighton en octobre 1987.

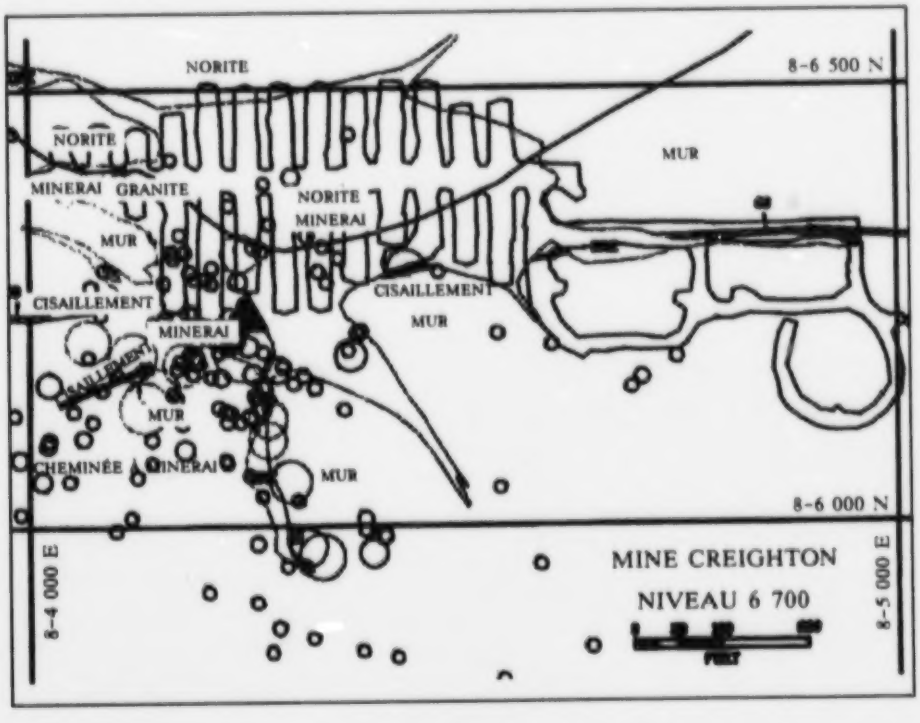



Figure 6 – Représentation de l'activité sismique après un coup de toit de magnitude 3,6 (Mine Creighton)

## Effets d'échelle

Au début de la mise en oeuvre du projet sur les coups de toit, il existait peu de données sur les relations entre la magnitude, le moment sismique, l'énergie sismique, la vitesse maximale et l'accélération maximale des particules dans les mines du nord de l'Ontario. On a donc utilisé les relations établies en sismologie générale

et celles qui ont été appliquées aux mines d'or d'Afrique du Sud. En 1990, on avait enregistré suffisamment de données par les systèmes macrosismiques et un sismographe portable pour être en mesure de définir les relations spécifiques au Nord ontarien.

La figure 7 montre la relation qui existe entre l'énergie sismique ($E_s$) et la magnitude (Mn). Les résultats ont nettement tendance à adopter la forme suivante :

$$\log E_s = 1{,}3\ Mn - 1{,}75 \text{ en MJ}$$

Il est toutefois ressorti que 22 % de l'énergie sismique totale est en général contenu dans l'onde P, comparativement à moins de 10 % dans les mines d'or d'Afrique du Sud.

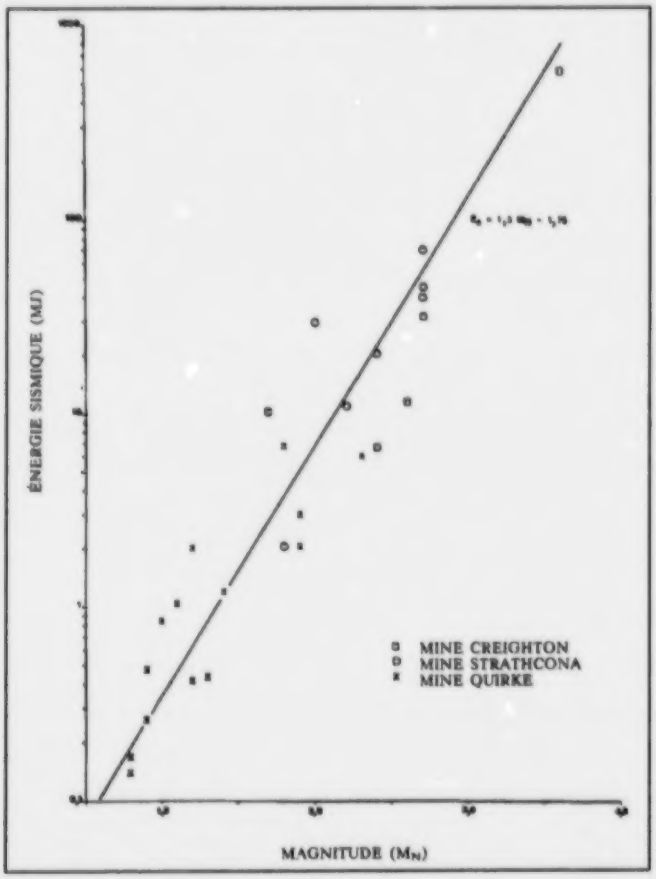



Figure 7 – Relation entre l'énergie sismique et les magnitudes dans les mines ontariennes

En plus de la magnitude (Mn), on utilise de préférence en sismologie le moment sismique (Mo) pour mesurer l'intensité d'un séisme étant donné que cette valeur renseigne sur les dimensions des failles et leur coulissage. La relation entre le moment sismique et la magnitude dans les mines ontariennes est montrée à la figure 8. Une étude réalisée en 1983 par Hasegawa sur les séismes d'origine naturelle dans le Bouclier canadien a abouti à la relation suivante :

$$\log Mo = 0{,}94\ Mn + 1{,}32 \text{ en GNm}$$

Les données recueillies dans les mines ont tendance à suivre la même relation.

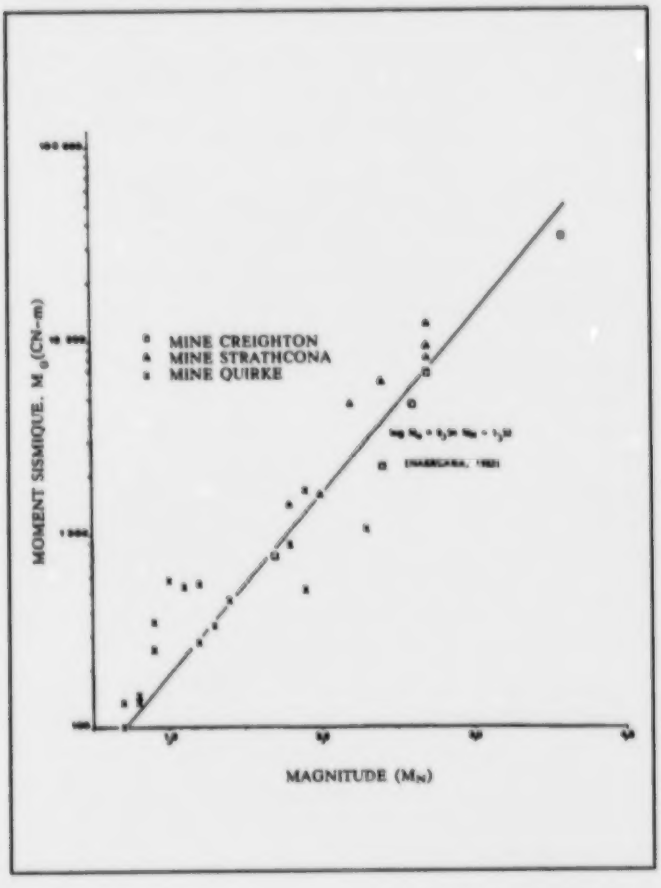



Figure 8 – Relation entre le moment sismique et la magnitude dans les mines ontariennes

La vitesse maximale des particules et, dans une moindre mesure, l'accélération maximale sont utilisées pour déterminer les dommages possibles causés par les coups de toit. Ces deux paramètres dépendent de la magnitude du coup de toit et la distance de la source. Pour évaluer les mesures, on a eu recours à un facteur étalonné faisant intervenir la racine cubique, utilisé dans les études sur le sautage. Les relations entre la vitesse maximale et l'accélération maximale des particules sont montrées aux figures 9 et 10, respectivement.

Dans le cas de la vitesse maximale des particules $\hat{v}$

$$\hat{v} = 4\ 000 \left( \frac{R}{10^{M/3}} \right)^{-1,6} \text{ in mm/s}$$

et dans le cas de l'accélération maximale des particules $\hat{a}$

$$\hat{a} = 30 \left( \frac{R}{10^{M/3}} \right)^{-1,33} \text{ in g}$$

L'atténuation des signaux sismiques en fonction de la distance (c.-à.-d. $R^{-1,6}$ et $R^{-1,33}$) est semblable à celle établie dans les études sur le sautage et représente les effets de champ proche. À grande distance, le facteur d'atténuation devrait correspondre à $R^{-1}$.

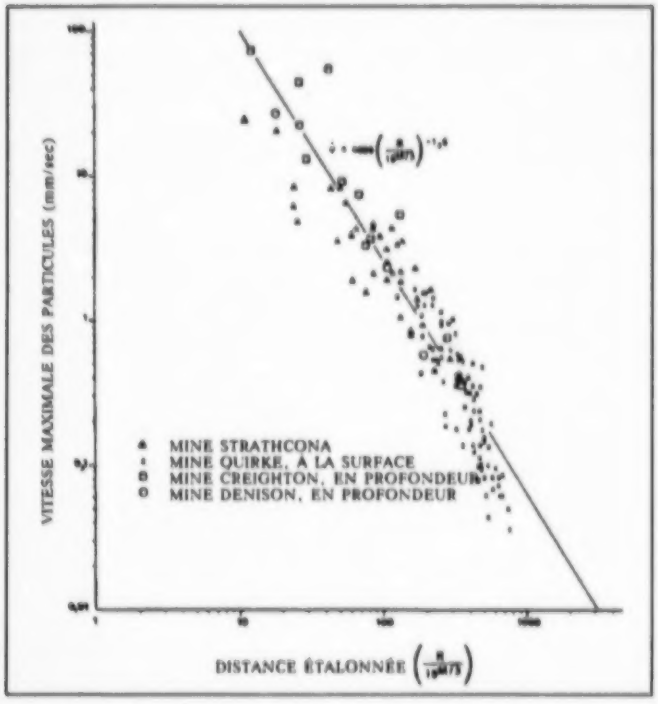



Figure 9 – Vitesse maximale des particules en fonction d'une distance étalonnée dans les mines ontariennes

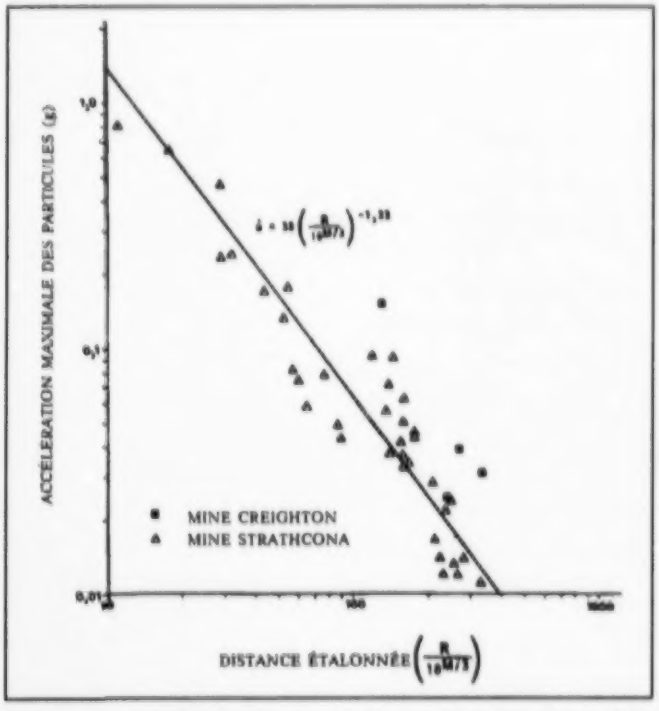



Figure 10 – Accélération maximale des particules en fonction d'une distance étalonnée dans les mines ontariennes

Contrairement aux séismes naturels et aux coups de toit enregistrés en Afrique du Sud, l'accélération maximale dans les mines ontariennes se produit souvent dans l'onde P et la vitesse maximale dans l'onde S. Ce fait conjugué à un pourcentage élevé de l'énergie sismique dans l'onde P font supposer un mécanisme autre qu'un coup de toit par coulissage.

Il y a eu suffisamment de coups de toit dans les mines Quirke, Creighton et Strathcona pour qu'une analyse de la chute d'énergie sismique pendant une période puisse être faite (figure 11). Les libérations d'énergie sismique à la mine Quirke se sont en grande partie produites de façon continue pendant une période de six mois. La mine Creighton est pour sa part caractérisée par quelques événements importants (de 3,3 à 4,0 Mn) répartis sur des périodes de 12 à 28 mois. À la mine Strathcona, l'énergie sismique a été libérée à un rythme plus graduel.

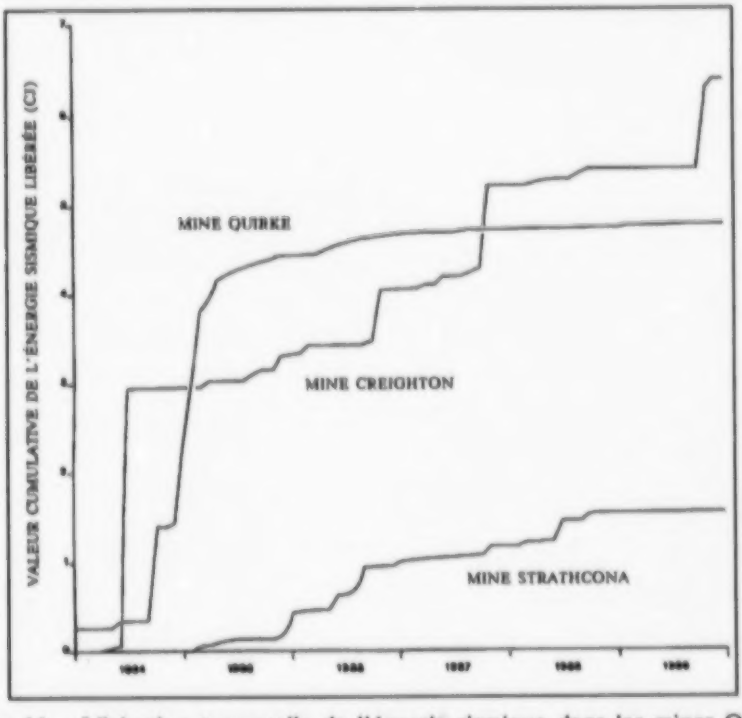
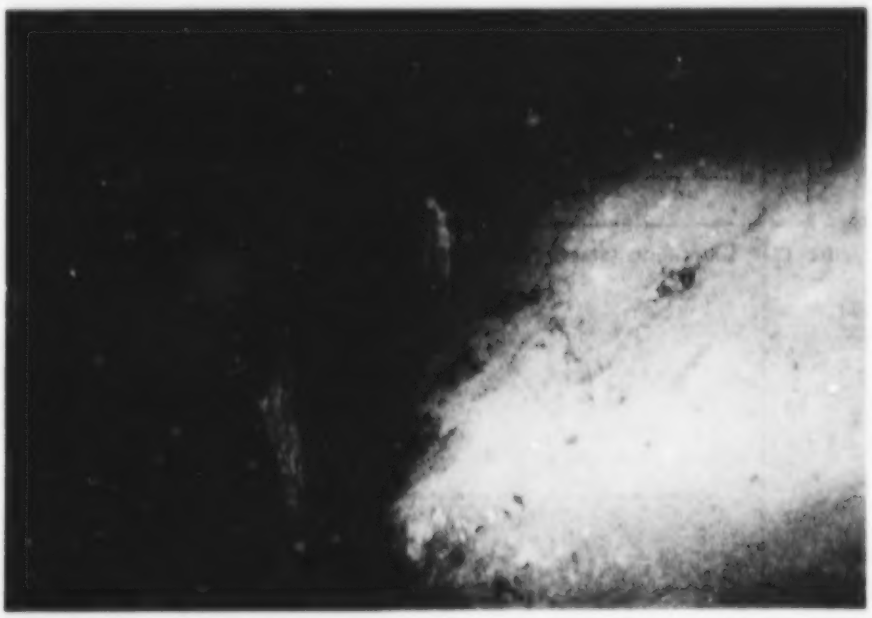



Figure 11 – Libération temporelle de l'énergie sismique dans les mines Quirke, Creighton et Strathcona

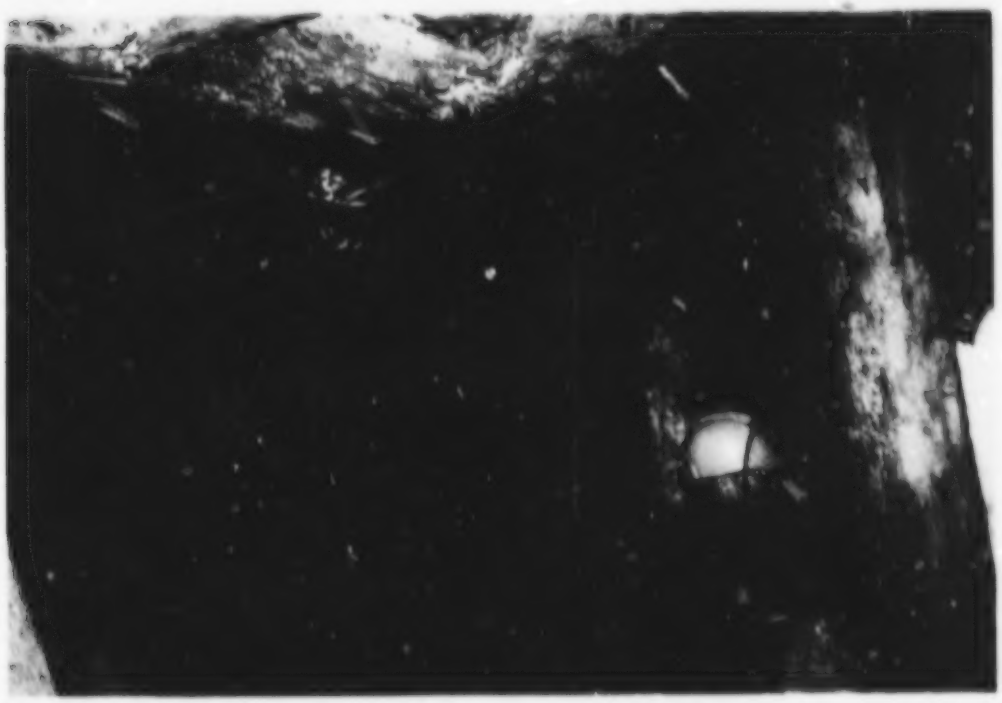
# Analyse photographique des coups de toit dans les mines ontariennes

Dommages causés à une galerie sur le niveau 6 600 de la mine Creighton, par un coup de toit de 3,6 Mn à environ 25 m de distance



Stot à la mine Campbell Red Lake ayant subi une libération de contraintes avant d'être abattu par longue taille

Déplacement de la voie causé par coulissage de faille au puits n° 5 de la Falconbridge

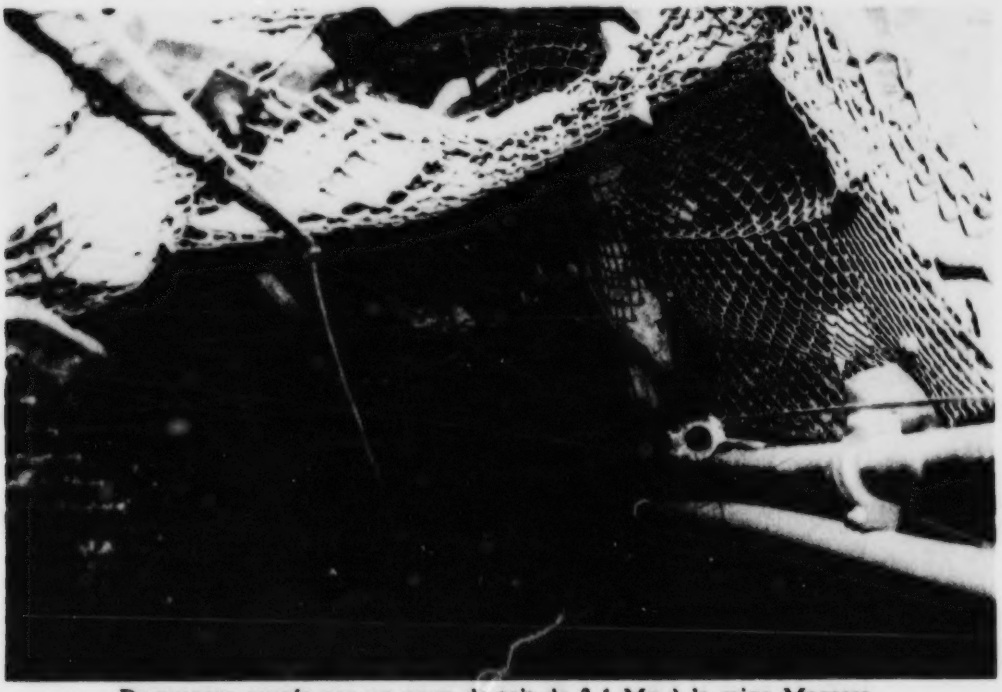


Un coup de toit a endommagé une galerie soutenue par des poteaux et des poutres de bois à la mine Macassa

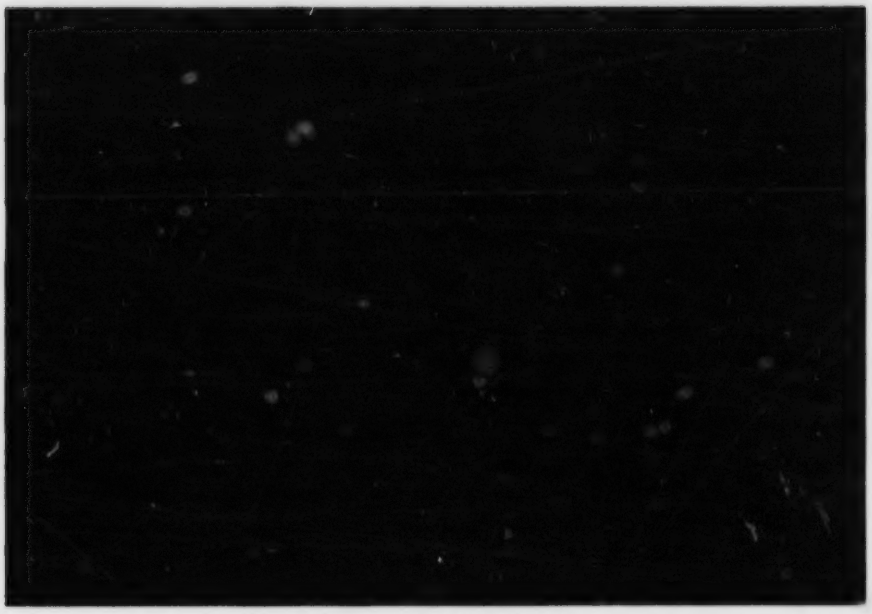
Plus de 800 tonnes de roche ont été déplacées par suite de deux petits coups de toit (2,0 Mn) dans une galerie de halage isolée dans la mine Strathcona

Écaillage d'un pilier de séparation dans la zone ayant subi un coup de toit dans la partie sud de la mine Denison

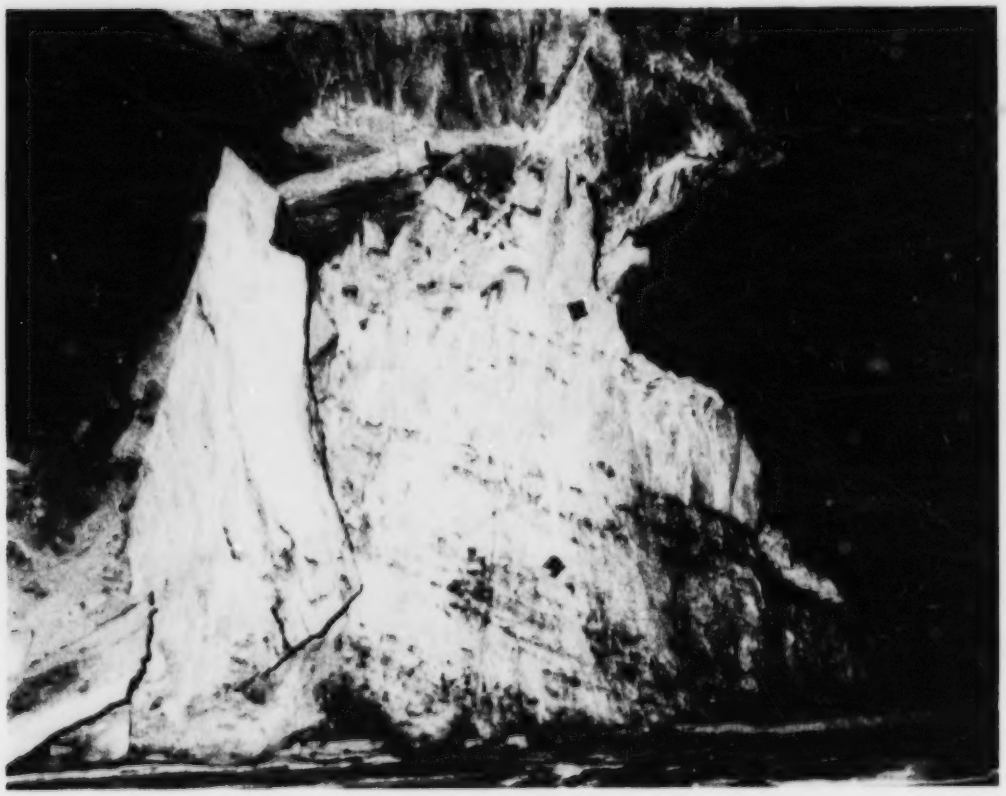
Entrelacement de câbles agrafés à la mine Strathcona.
Ce type de soutènement n'a pas été endommagé par un coup de toit de magnitude 3,4 qui s'est produit à 40 m de distance



Dommages causés par un coup de toit de 3,1 Mn à la mine Macassa.
Les boulons et le grillage à simple torsion ont empêché la fermeture complète de la galerie



Dommages causés à une galerie de sole à la mine Quirke



Remblai répandu autour d'un pilier fracturé à la mine Denison

# Mines d'Elliot Lake

## Rio Algom Limitée

Les coups de toit survenus à la mine Quirke constituent un exemple classique de réaction en chaîne de ruptures de piliers. Pendant une période de cinq ans, plus de 160 événements sismiques, de magnitude atteignant 3,5, ont été enregistrés par le Réseau sismique de l'est du Canada.

Un plan de la partie est du filon principal à la mine Quirke localisant les coups de toit est présenté à la figure 12. Le problème des coups de toit a débuté en 1982, près d'une zone d'essai sans rail. Le nombre des coups de toit et leur étendue ont augmenté considérablement à la fin de 1984 et au début de 1985. Ils se sont manifestés de deux façons. En premier lieu, une rupture violente des piliers s'est produite en bordure de la zone touchée, ce qui a contribué à l'étendre. En deuxième lieu, un certain nombre d'événements se sont produits au centre de la zone touchée, accompagnés par une augmentation brusque de 1 000 L/min du débit de l'eau pénétrant dans la mine et une chute de 4 m du niveau d'eau dans un petit lac situé directement au-dessus de la zone. Ces derniers événements ont probablement eu lieu dans le toit et ont été causés par un coulissage le long de failles quasi verticales et le long de contacts de stratification. Étant donné que le toit s'est fracturé jusqu'à la surface, le niveau de l'activité microsismique a diminué considérablement tout comme le nombre et la magnitude des événements plus importants. La zone touchée a cessé de s'accroître en étendue et l'activité s'est essentiellement stabilisée.

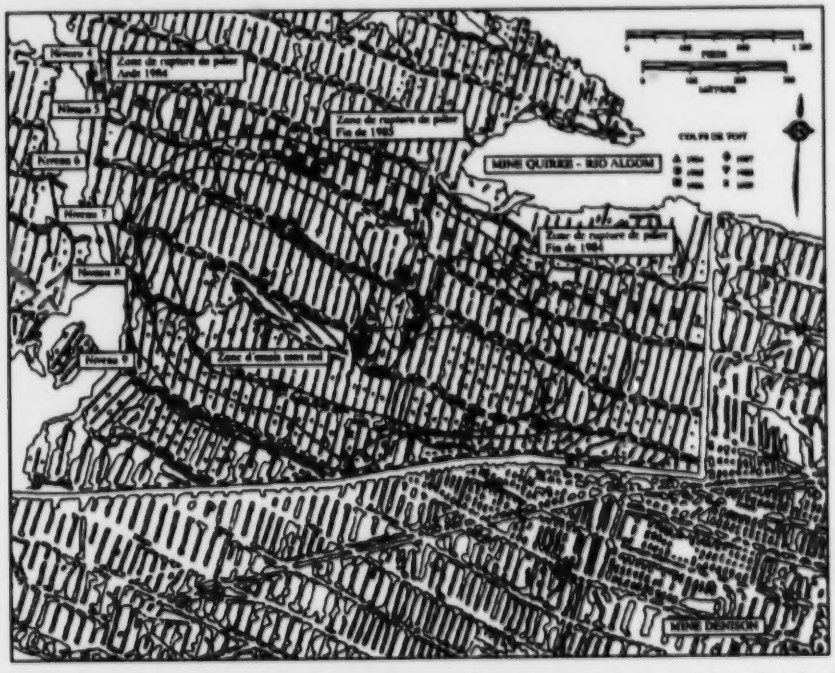



Figure 12 – Plan de la mine Quirke indiquant les emplacements des coups de toit, de 1984 à 1989

Dans le cadre du projet sur les coups de toit, on a percé à la foreuse au diamant deux trous à partir de la surface pour évaluer le degré de fracturation du toit au-dessus de la zone touchée. Le premier trou a traversé un ancien trou d'exploration. Tout au long des opérations, on a enregistré une perte continue d'eau de forage par le fond du trou. De plus, on a pu constater que l'ancien trou de sondage s'était déplacé

latéralement, dû à un coulissage le long de contacts de stratification, à plusieurs endroits. Le percement a dû être finalement abandonné à une profondeur de 265 m, à environ 240 m au-dessus du massif minéralisé.

En 1988, un nouveau trou a été foré au diamant, directement au-dessus du centre de la zone des coups de toit. Le forage a progressé jusqu'à une profondeur de 317 m, à environ 170 m au-dessus du massif minéralisé, avant d'être interrompu à cause de problèmes de perte d'eau. On a relevé deux types de fractures ouvertes. Jusqu'à une profondeur de 150 m, l'eau s'est infiltrée à huit endroits, dû principalement à la présence de fractures ouvertes secondaires sur des contacts de stratification. À la profondeur de 155 m, on a atteint une ouverture de 100 mm de largeur à travers laquelle l'air était aspiré vers le bas du trou de sondage en direction de la mine. Des ouvertures semblables de 100 mm et 150 mm ont été rencontrées aux profondeurs de 234 m et 255 m. La figure 13 illustre les problèmes surgis au cours du forage des deux trous.

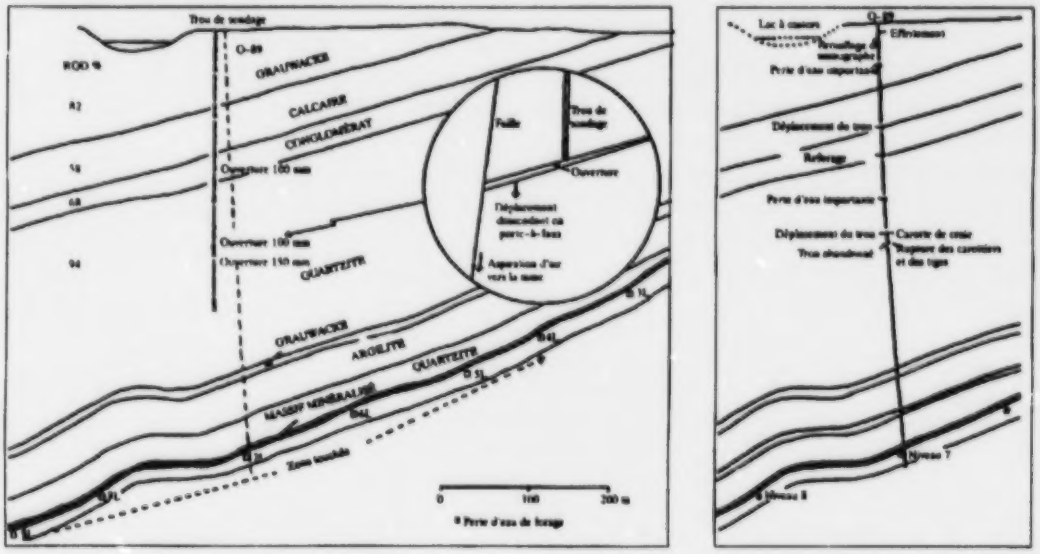



Figure 13 – Problèmes rencontrés au cours du forage de deux trous au-dessus de la zone des coups de toit à la mine Quirke

Pour que l'eau et l'air atteignent le trou de sondage et s'infiltrent dans la mine, il faut que des fractures verticales soient présentes. On présume que l'éboulement s'est limité aux premiers mètres du toit. Sur les 350 m suivants, des blocs ou plaques de très grandes dimensions se sont déplacés vers le bas le long des failles verticales en porte-à-faux. Les 150 m supérieurs se sont effondrés malgré l'absence de fractures verticales importantes.

## Denison Mines Limited

Deux parties de la mine Denison sont sismiquement actives : l'une est située directement en aval-pendage de la zone principale des coups de toit à la mine Quirke et l'autre dans une zone isolée à environ 2 km à l'est. Dans ces deux zones, pour stabiliser les piliers, on a déversé des résidus déschlammés et du laitier de ciment, dans un rapport de 30 à 1. CANMET a réalisé dans le passé des essais en laboratoire sur des échantillons de roche entourés de remblais cimentés. Les résultats obtenus indiquent que les remblais n'avaient aucun effet sur la résistance maximale des piliers mais qu'ils en avaient sur le comportement postérieur à la rupture. À mesure que l'on augmente la teneur en ciment, la contrainte qui s'exerce sur le

pilier après la résistance maximale diminue graduellement et se stabilise pour atteindre une résistance résiduelle, néanmoins importante (c.-à-d. entre 60 et 75 % de la résistance maximale). Par conséquent, la rupture n'est pas violente et l'énergie sismique libérée est minime.

Un plan de la zone à piliers périmétriques dans la mine Denison, figurant les chantiers remblayés et l'emplacement des événements sismiques survenus en 1989, est présenté à la figure 14. La plupart des événements sismiques se sont produits à l'extrémité de la zone remblayée dans des piliers non entourés de remblais. Les principales exceptions sont les événements survenus dans la zone où les piliers étaient récupérés entre les chantiers remblayés. Dans ce cas, il semble que le remblai a contrôlé la rupture violente des piliers et que l'énergie sismique libérée par les zones remblayées a été minime.

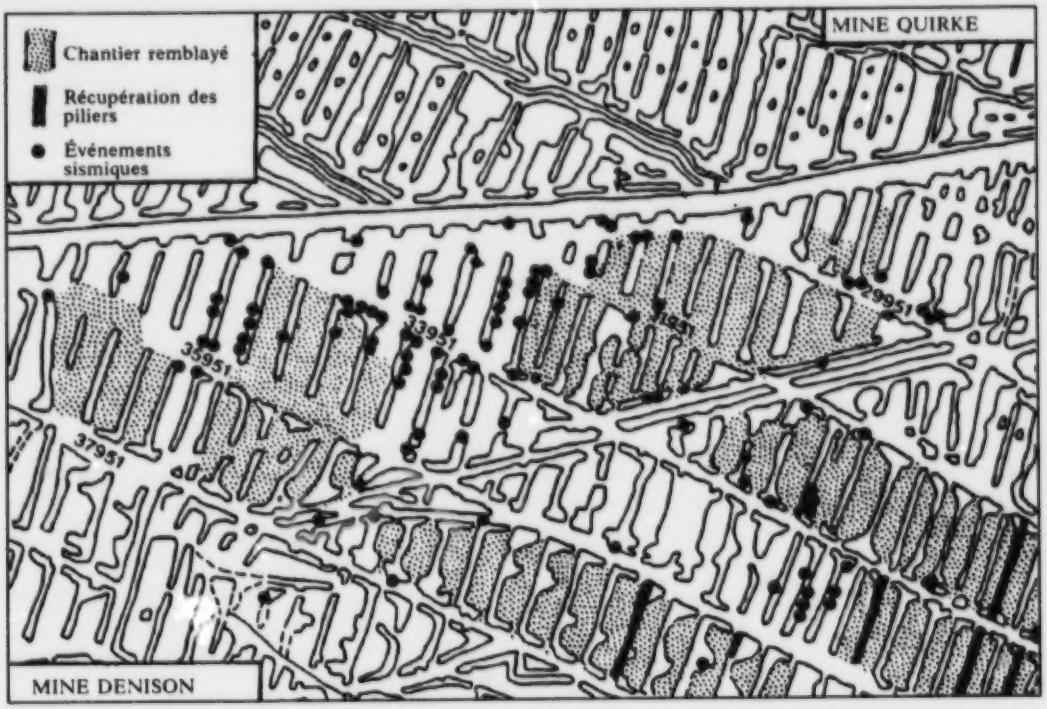



Figure 14 – Plan de la mine Denison figurant les emplacements des événements sismiques dans la zone de piliers périmétriques en 1989

La figure 15 montre les chantiers remblayés et localise l'activité sismique entre 1987 et 1989 dans la partie est de la mine Denison. On a enregistré des événements de magnitude atteignant 2,8 suivant une bande étroite traversant cette zone du nord-est au sud-ouest. L'activité microsismique est plus disséminée, couvrant une zone de 800 m en direction sur 500 m en pendage, même si l'on note une concentration de l'activité autour des événements de grande magnitude. Dans ce cas, on observe une activité microsismique considérable dans certains piliers entourés de remblai. Cette activité s'est surtout produite durant le déversement du remblai et elle a pu être causée par l'eau qui réduit la résistance de la roche en bordure des piliers. Cependant, lorsque les piliers ont été encastrés dans le remblai, l'activité sismique a essentiellement cessé. Ce type de comportement n'a pas été observé dans la zone des piliers périmétriques étant donné que ces piliers étaient plus volumineux et subissaient une contrainte moins élevée.

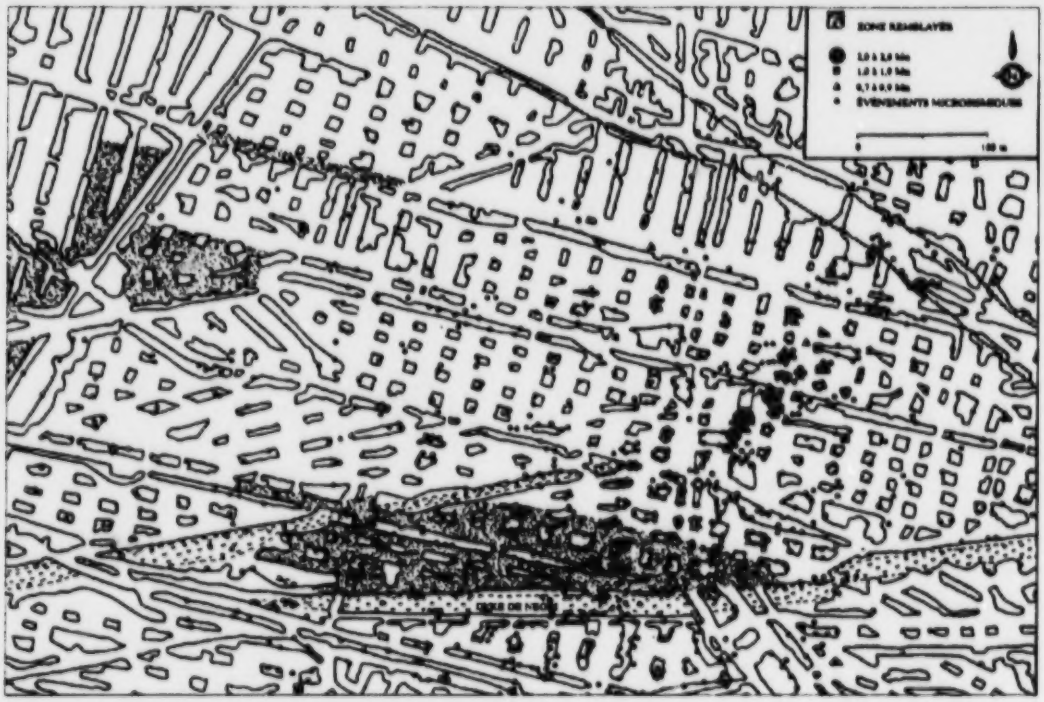


Figure 15 – Plan de la partie est de la mine Denison figurant l'étendue de l'activité sismique, (1987 à 1989)

Pour limiter la zone touchée de la mine Denison, montrée à la figure 15, on a entrepris de déverser une barrière de remblai de 120 m de large dans les chantiers longeant la limite nord–ouest de la zone.

## Mines de Kirkland Lake

### Lac Minerals Ltd.

Depuis le début des années 1930, des coups de toit ont été enregistrés dans les mines d'or de Kirkland Lake. Des sept mines exploitées à cette époque, il n'en reste plus qu'une, la mine Macassa. Les massifs minéralisés à filon étroit et pendage abrupt s'étendent jusqu'à une profondeur de 2 200 m et sont exploités par tranches remblayées. Plus de 400 coups de toit ont été signalés dans la mine Macassa au cours de ces 55 années d'exploitation continue. Ces coups de toit ont varié allant de coups de toit de déformation dans les galeries d'avancement à des coups de toit en piliers au cours de l'abattage des stots. La plupart de ces coups de toit se sont produits peu de temps après le sautage central. Environ 10 % de ces coups de toit sont considérés de forte intensité, ayant déplacé plus de 50 tonnes de roche. À la mine Macassa, on recourt au sautage de libération des contraintes et à des remblais rigides pour réduire les dangers liés aux coups de toit, leur gravité et les dommages qu'ils peuvent causer.

Les niveaux ont été tracés à des intervalles de 45 m verticalement et la méthode d'abattage utilisée a été celle dite de coupe et remblai par gradin ascendant, caractérisée à l'origine par des remblais de gangue non consolidée. Les problèmes liés aux coups de toit se sont habituellement manifestés dans les stots alors que

leur épaisseur nominale était réduite à 15 m avec un taux d'extraction d'environ 67 %. Les modèles informatiques indiquent des contraintes perpendiculaires d'environ 150 MPa s'exerçant sur ces piliers. Une méthode couramment utilisée est de libérer les contraintes sur les piliers à cette étape.

Dans le cadre du projet sur les coups de toit, on a observé un sautage de libération des contraintes dans un stot situé au-dessous du niveau 5 725 au moyen d'un réseau microsismique et d'appareils de mesure de la convergence entre le toit et le mur. Avant le sautage, le pilier avait été ébranlé par trois coups de toit : deux dans les monteries situées à chaque extrémité du pilier et un dans le chantier arrière. Pour le sautage, on a foré 14 trous forés dans le massif minéralisé, espacés de 3 m et chargés avec une densité de 0,15 kg/m³. Les trous de mine forés près des deux monteries ne pouvaient pas être chargés convenablement à cause d'une convergence des parois rocheuses.

Le sautage a été suivi d'une activité microsismique considérable (figure 16) concentrée autour du stot. Cependant, certaines parties du pilier n'ont pas été secouées par les oscillations, en particulier le pilier près du premier trou de mine foré à proximité de la monterie est, lequel n'a pas été entièrement chargé. Une convergence d'environ 25 mm a également été observée dans le chantier, sauf près de la monterie est où elle n'a atteint que 6 mm. L'abattage subséquent du stot a provoqué un petit coup de toit près de cette monterie causant des dommages aux poteaux de bois; la convergence dans cette zone a également augmenté jusqu'à 33 mm. On a conclu que la convergence et l'activité microsismique initiale ne révélait qu'une libération partielle des contraintes s'exerçant sur le stot.

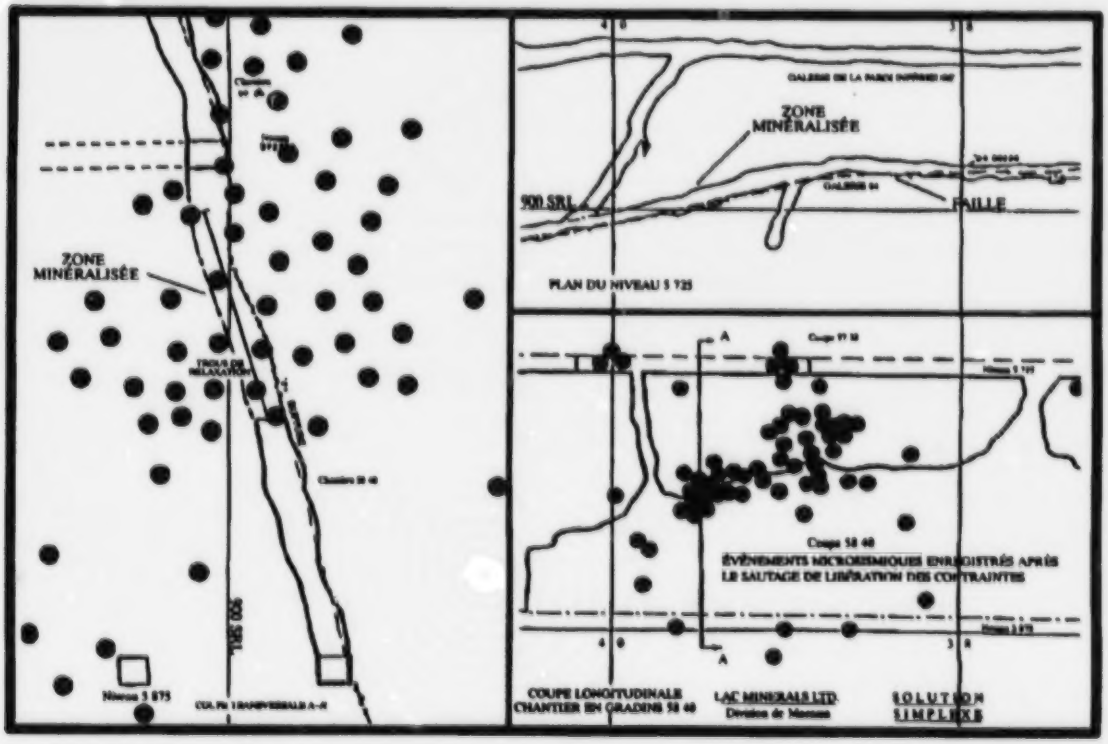



Figure 16 – Points d'activité microsismique après le sautage de libération des contraintes d'un stot à la mine Macassa

Un an plus tard environ, une série de coups de toit se sont produits après un sautage dans le stot situé directement au-dessus du pilier libéré. Environ 1 000 tonnes de roche ont été déplacées, et la galerie près du stot libéré a également subi des dommages. Cette galerie était située au-dessus d'un pilier de gangue toujours sous contraintes. Dans l'analyse finale, la libération des contraintes s'exerçant sur le stot a amélioré la récupération du pilier, mais a pu contribué à créer des problèmes de coups de toit dans les piliers environnants.

Avant 1986, on utilisait, dans la mine Macassa, des roches non consolidées comme matériaux de remblayage. Lorsque de violents coups de toit se sont produits, ce type de remblai avait tendance à se déplacer vers les galeries, rendant la restauration coûteuse et fastidieuse. Lors du fonçage du nouveau puits n° 3 jusqu'à une profondeur de 2 202 m, on a examiné les systèmes de remblayage. Au début, on a utilisé du béton dans les chantiers exploités par gradins ascendants. Même si cette méthode a limité la convergence des parois, elle s'est avérée trop coûteuse. On a alors réalisé des essais de déversement d'un laitier de ciment au-dessus d'un remblai rocheux de traçage comportant une teneur en ciment de 5 %. Le recours à un remblai cimenté visait un double objectif : réduire la fermeture des parois rocheuses et, de ce fait, le changement d'énergie potentielle, et absorber l'énergie qui serait autrement libérée sous forme d'énergie sismique.

Il est possible de comparer les réactions des remblais non consolidés et cimentés aux coups de toit de forte magnitude. En 1982, un coup de toit de magnitude 3,1 a été enregistré dans un chantier à remblai rocheux non consolidé après une extraction de seulement 15 %. Il en est résulté un déplacement de plus de 1 000 tonnes de roche, ainsi que la fermeture complète de galeries qui ont nécessité cinq mois de travaux de restauration. Un deuxième coup de toit, de même magnitude, s'est produit dans le chantier sus-jacent en 1989. On avait utilisé des remblais cimentés dans ce chantier abattu à 40 %. Dans ce cas, seulement 130 tonnes de roche ont été déplacées, ce qui a nécessité un mois de travaux de restauration.

L'amélioration des conditions de terrain par l'emploi de remblais cimentés a rendu inutile le sautage de libération des contraintes et a permis d'améliorer les méthodes de récupération des stots. La figure 17 illustre une des méthodes actuellement utilisées pour récupérer les stots ainsi qu'une autre technique de dépilage par rabattage pour extraire le minerai en profondeur sans stots. Dans les deux cas, on réduit au maximum l'énergie potentielle et l'absorption.

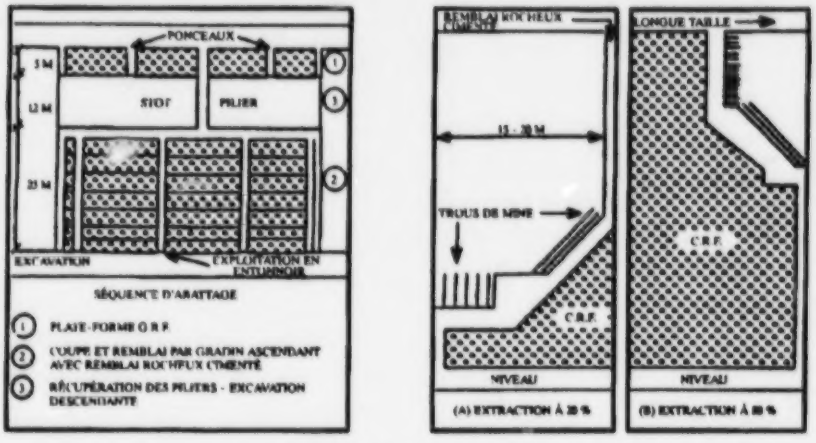



Figure 17 – Nouveaux plans d'abattage avec remblais cimentés à la mine Macassa
(d'après W. Quesnel *et al.*, 1989)

# Mines de Red Lake

## Placer Dome Inc.

Depuis le début des années 1960, la mine Campbell de la Placer Dome a été secouée par des coups de toit. Ces secousses se sont surtout produites dans les stots des chantiers exploités par chambres–magasins et par tranches montantes remblayées. Par de nombreux aspects, les massifs minéralisés étroits à pendage abrupt, les méthodes d'extraction et les coups de toit observés à Red Lake sont semblables à ceux de Kirkland Lake.

Par contre les coups de toit qui ont secoué les chantiers exploités par chambres–magasins dans la zone F de la mine Campbell font exception. Ce massif minéralisé, mesurant environ 2 m de largeur, s'étend sur 450 m en direction et a été exploité jusqu'à une profondeur de 700 m. Les piliers de point de soutirage et les piliers de sole de 6 m de largeur ont été conservés donnant une extraction d'environ 80 %. Lorsque l'on vide la chambre du minerai abattu, le tracé d'exploitation se transforme en un tracé à chambre vide et pilier qui est sujet à une réaction en chaîne de ruptures de pilier semblable à celle observée à la mine Quirke à Elliot Lake. Cette situation s'est produite à la fin de 1983 lorsque 22 coups de toit importants de magnitude atteignant 3,3 se sont déclenchés, accompagnés d'une activité microsismique intense pendant une période de 28 heures. Il en est résulté la fermeture de sept niveaux sur une distance verticale de 280 m; depuis cet événement, ce massif minéralisé n'a pas été exploité.

Dans le cadre du projet sur les coups de toit, on a entrepris une rétroanalyse des ruptures de stots dans les chantiers exploités par chambres–magasins et tranches remblayées. Le graphique de la figure 18 montre la contrainte moyenne qui s'exerce sur les stots à mesure que l'abattage progresse vers le haut. Dans les exemples donnés, les ruptures de piliers se produisent à la largeur de 6,5 m sur le niveau 16, et de 8,5 m sur le niveau 18. Cependant, les conditions du terrain vont se détériorer avant cela, étant donné les fortes contraintes qui s'exercent sur l'arrière du chantier. Par ce type d'analyse, on peut déterminer s'il est nécessaire de recourir à un sautage de libération des contraintes ou s'il faut abandonner la méthode d'abattage par tranches horizontales pour celle des longs trous verticaux.

Depuis 1982, on a effectué quatre sautages de libération des contraintes dans des piliers de la mine Campbell mais les résultats ont été variables. La libération des contraintes a pour principal objectif de réduire l'énergie potentielle du massif rocheux. Pour ce faire, on fracture le pilier ce qui a pour effet d'amener le toit et le mur à converger.

On a procédé à deux sautages de libération des contraintes dans les stots des chantiers exploités par tranches remblayées. Dans un cas, un coup de toit s'est produit quelques secondes après le sautage, et l'on a récupéré le pilier sans avoir à faire face à des problèmes de contrainte. Dans le second cas, un coup de toit s'est produit trois jours après le sautage à un emplacement où la fermeture mesurée après le sautage était très faible.

Le sautage de libération des contraintes dans les piliers des points de soutirage dans les chantiers exploités par chambres–magasins a provoqué des coups de toit sur d'autres niveaux. Il n'est donc pas recommandé de libérer les contraintes dans un chantier exploité par chambres–magasins (ou par chambres vides et piliers).

Dans le cadre du projet sur les coups de toit, on a examiné un sautage de libération des contraintes dans le stot d'un chantier exploité par tranches remblayées sur le niveau 15. Dans ce cas, le sautage a été produit

dans une veine de ramification dans le mur et visait à produire une zone de faible contrainte lors de l'abattage de la veine principale. Des modèles numériques ont été utilisés pour déterminer les contraintes et les déplacements avant et après le sautage. Le système microsismique a été conjugué à un enregistreur des formes d'ondes sismiques complètes.

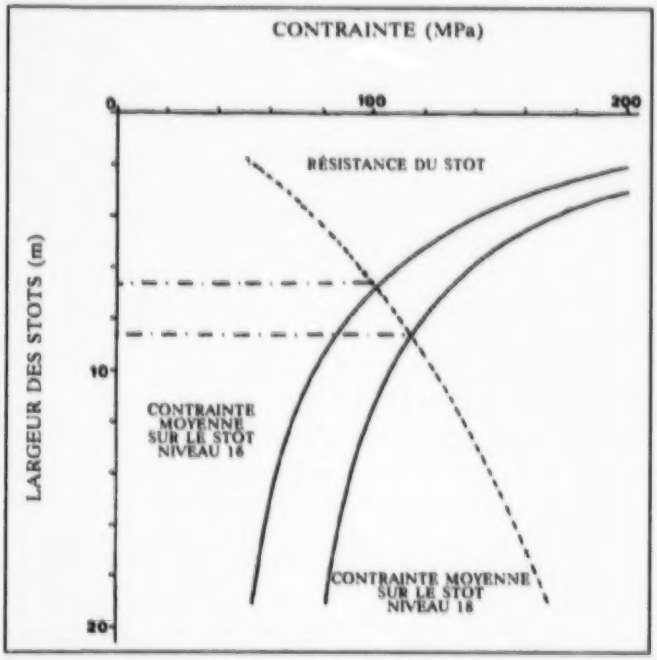



Figure 18 – Analyse des contraintes exercées sur les stots à la mine Campbell, et de leur résistance

Après le sautage, des mesures instrumentales de la convergence et des contraintes indiquaient une réduction d'environ 50 % du module d'élasticité de la roche, telle que déterminée par les modèles numériques. Cependant, comme on n'a enregistré que huit événements microsismiques du côté opposé du stot, les contraintes s'exerçant sur ce dernier ne devaient pas être élevées. Par conséquent, le pilier a été récupéré sans problèmes de contraintes.

Toujours dans le cadre du projet sur les coups de toit, on a entrepris des essais sur la réaction de divers systèmes de soutènement à un chargement dynamique. Huit types de soutènement, de 2 m de longueur, ont été installés dans une petite section de galerie, et des charges explosives ont été mises en place à des distances fixes des soutènements. Des géophones ont été fixés aux extrémités des soutènements ainsi qu'au front de taille, afin de mesurer la vitesse maximale des particules. Les résultats typiques obtenus avec certains soutènements (c.-à-d. boulons mécaniques sous tension, tiges crénelées et cimentées et soutènements à friction) sont présentés à la figure 19. Les vitesses maximales des particules sur ces soutènements ont été systématiquement moins élevées qu'au front de taille et on a observé des différences cohérentes entre les soutènements. Il est probable qu'à des distances plus grandes, les vitesses maximales des particules sur la roche et le soutènement convergent vers une valeur commune. Lorsqu'on calcule la poussée maximale sur les soutènements, il ressort que ces trois types de soutènements réagissent de façon semblable comme l'indique la figure 19. La force maximale tient compte de la différence de superficie de la section des soutènements en acier. Si l'on se base sur ces résultats, un modèle de force constante plutôt qu'un modèle de vitesse maximale constante des particules ou d'impulsion par contrainte devrait s'appliquer

lors de la conception de systèmes de soutènement sujets à des coups de toit. Il faudra accomplir de nombreux autres travaux de recherche dans ce domaine.

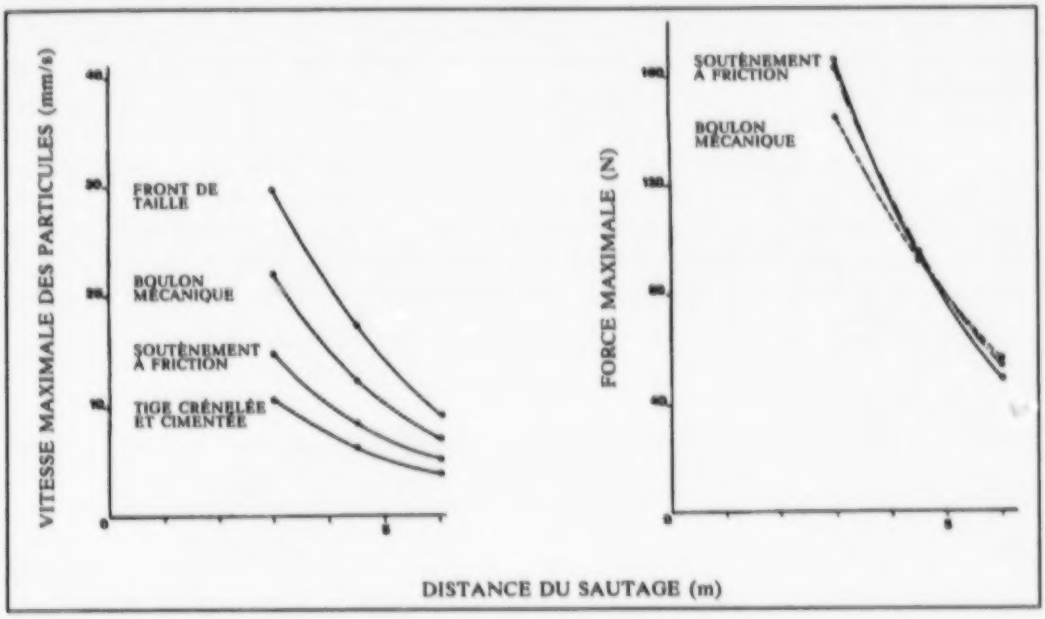



Figure 19 – Vitesse maximale des particules et force appliquée sur différents types de soutènement soumis à des coups de toit

## Mines de Sudbury

### Falconbridge Limitée

La Falconbridge exploite six mines dans le bassin de Sudbury, qui ont toutes subi des coups de toit à divers degrés. Cependant, c'est dans le puits n° 5 de la Falconbridge et dans la mine Strathcona que la plupart des coups de toit ont eu lieu. La Falconbridge a entrepris des études avec l'Itasca Consulting Group sur les mécanismes de coulissage le long des failles. Elle a également travaillé avec le Département géoscientifique de l'Université Queen's sur des études tomographiques et une rétroanalyse des données microsismiques. Les premiers essais sur un système de soutènement par laçage ont été réalisés à la mine Strathcona.

Les coups de toit survenus au puits n° 5 en 1984 ont malheureusement causé quatre accidents mortels et la fermeture de la mine. Ces incidents ont fourni une nouvelle incitation à la mise sur pied du Projet Canada–Ontario–industrie sur les coups de toit.

Ces coups de toit sont les premiers indices indiquant un mécanisme de coulissage de compartiment de failles dans les mines ontariennes. Une analyse des configurations de l'activité microsismique après deux coups de toit importants a révélé que toute l'activité sismique était limitée au mur, formant un quadrant. L'activité s'est propagée sur un rayon de 180 à 200 m, centrée sur l'emplacement des coups de toit, ce qui est passablement conforme aux modèles théoriques.

À la mine Strathcona, un massif minéralisé tabulaire irrégulier s'étendait sur environ 800 m en direction et plongeait à environ 45°. On avait conservé un pilier de sole horizontal entre les niveaux 2 000 et 2 400, les chantiers sus-jacents et sous-jacents ayant été abattus et remblayés avec des résidus cimentés. L'abattage du pilier de sole par mines longues a commencé en 1983 et, depuis 1985, plus de 40 coups de toit, de magnitude allant jusqu'à 3,2, ont été enregistrés dans le pilier de sole. À la figure 20, une coupe longitudinale du pilier de sole montre l'emplacement des coups de toit et l'activité minière. Même si les coups de toit sont causés par l'exploitation, le mécanisme semble lié au coulissage le long des structures géologiques. Ces structures sont des systèmes sub-parallèles ramifiés associés au dyke principal qui traverse le centre du pilier de sole. Le dyke principal n'a été secoué par aucun coup de toit important, seulement par une activité microsismique. Dans de nombreux cas, des coups de toit se sont produits à moins de 24 heures après les sautages de production qui sont habituellement planifiés pour le vendredi soir, pendant la dernière période de travail de la semaine, de manière à laisser deux jours à la mine pour revenir au calme.

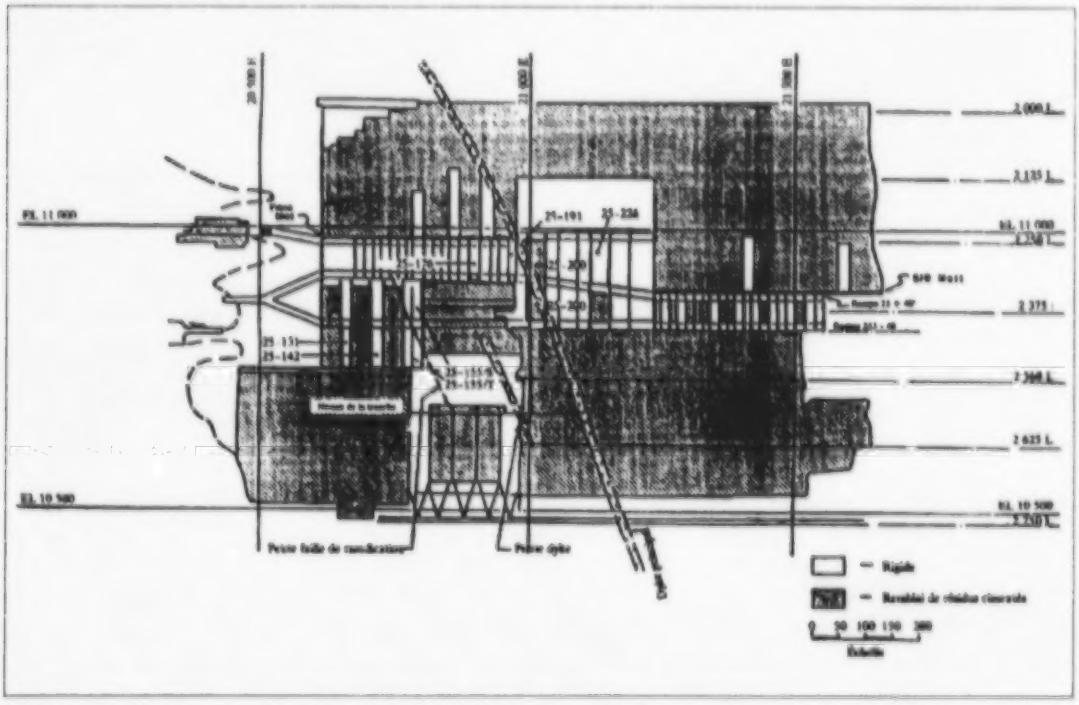


Figure 20 – Vue longitudinale en élévation de la mine Strathcona montrant les principales structures, les zones remblayées et les panneaux à abattre (d'après Davidge, 1987)

Les mécanismes de coulissage le long des structures autour du chantier 23-200 ont été analysés par la société et l'Itasca Consulting Group au moyen d'un modèle de bloc à éléments distincts. La figure 21 montre les trajectoires des contraintes et le coulissage sur la structure durant les étapes de l'abattage dans le chantier 23-200. Durant les étapes initiales de l'exploitation (voir (a) et (b) de la figure 21), le coulissage s'est limité aux structures présentes dans la partie sud-est du chantier. Les travaux suivants (voir (c) et (d) de la figure 21) ont modifié le coulissage des structures dans la partie ouest du chantier. La configuration de l'activité microsismique était conforme aux résultats de cette analyse.

Pour régler ce problème de coups de toit, la société a entrepris un programme de soutènement par laçage dans la galerie d'accès au pilier de sole. Ce système à multiples composantes comportait des oeillets filetés

en acier doux de 14 mm de diamètre, entièrement cimentés dans des trous de 1,8 à 2,4 m, et espacés de 1,8 m, centre à centre. Le grillage métallique galvanisé simple torsion à mailles de 100 mm a été maintenu contre la paroi rocheuse avec des plaques posées sur les oeillets filetés. Un câble métallique de 12,5 mm de diamètre a été enfilé à travers les oeillets formant un tracé en losange et a été tendu à environ 2,5 tonnes.

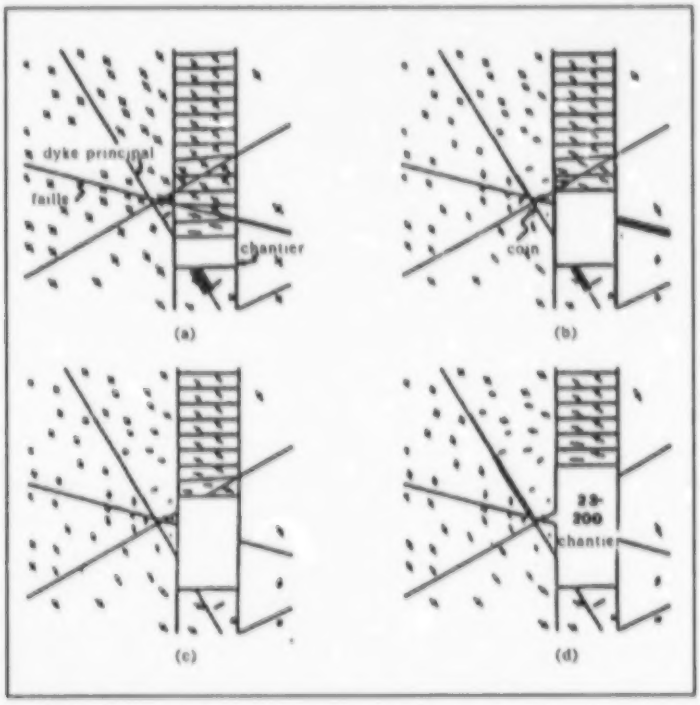



Figure 21 – Déplacement du cisaillement lié à l'abattage dans la mine Strathcona (d'après Brady, 1988)

Après la mise en place de ce soutènement dans la galerie, il s'est produit un coup de toit de magnitude 3,0 qui a gravement endommagé le chantier soutenu de façon classique (tige crénelée et cimentée et grillage métallique), situé à une distance de 25 m. Le laçage le plus proche était situé à environ 40 m du coup de toit. Cette zone n'a pas subi de dommages mais l'on a observé la formation de poches dans le grillage et le chargement des câbles flexibles. Un autre coup de toit de magnitude 2,7 a causé la rupture d'un câble métallique et la formation de poches et le chargement du grillage et des câbles.

Le projet sur les coups de toit a participé au financement d'études entrepris par le département géoscientifique de l'université Queen's portant sur la rétroanalyse des données sismiques enregistrées à la mine Strathcona. La précision des techniques de localisation des sources et le lien qui existe entre la configuration de l'activité microsismique et la séquence d'extraction ont également été examinés.

On a comparé les temps d'arrivée maximaux de l'onde P enregistrés par le système microsismique Electrolab MP–250 et les formes d'ondes entières recueillies par le système microsismique de l'université Queen's. Il est ressorti que le système MP–250 réagit à une impulsion de bruit ou à l'arrivée de l'onde S ce qui produit des localisations erronées des sources. De plus, le système MP–250 enregistre des événements non sismiques, que ce soit les sautages, les travaux de forage et de chargement, les vibrations des équipements, et le redéclenchement d'événements de longue durée. Après réévaluation, il ressort que seulement 30 % environ du nombre total des événements enregistrés étaient des événements sismiques réels. Compte tenu

de l'algorithme de localisation des sources utilisé (c.-à-d. les moindres carrés), les événements non sismiques ont tendance à s'aligner le long de directions linéaires ce que l'on pourrait interpréter comme une activité se produisant le long de structures géologiques.

## Inco Limitée

L'Inco exploite actuellement neuf mines dans le bassin de Sudbury. Depuis le début des années 1930, certaines d'entre elles ont été secouées par des coups de toit. Au départ, la mine Frood était la plus active sur le plan sismique, mais ces dernières années, ce sont les mines Creighton et Copper Cliff North qui ont été les plus touchées. À ce jour, cinq systèmes microsismiques ont été installés dans ces mines.

Au cours des années, l'Inco a mis au point des techniques et des stratégies pour régler le problème des coups de toit. Elle a eu recours, entre autres, au sautage de libération des contraintes dans les puits, les galeries et les piliers de chantier; à l'extraction séquentielle pour minimiser les dangers; et plus récemment, à l'identification des structures géologiques sismiquement actives.

L'Inco a classifié les coups de toit en trois catégories :

- les événements qui se produisent dans les galeries d'avancement où se concentrent les fortes contraintes que l'on peut prévenir en adoptant des solutions stratégiques comme la modification de la forme de l'ouverture, le sautage de libération des contraintes ou l'amélioration des systèmes de soutènement;
- les événements qui se produisent dans les chantiers, notamment les coups de toit et le coulissage des compartiments de failles, que l'on peut prévenir par des méthodes stratégiques en faisant appel, par exemple, à des piliers déformables et à l'extraction séquentielle pour uniformiser la libération d'énergie; et
- les événements qui se produisent dans la paroi opposée au massif minéralisé, lesquels sont toujours causés par des coulissages et sont liés à l'activité minière régionale. Les mesures à prendre contre ces coups de toit sont peu nombreuses et se limitent à l'amélioration des soutènements.

Les premiers coups de toit enregistrés dans la mine Creighton remontent à 1934. L'extraction minière a atteint une profondeur de 2 200 m dans des conditions de contraintes très élevées. Sur le niveau 6 600, par exemple, les contraintes s'élèvent à environ 95 MPa parallèlement au massif minéralisé, à 70 MPa à travers le massif minéralisé et à 60 MPa verticalement. Dans de telles conditions, le sautage de libération des contraintes est régulièrement accompli dans les galeries et les piliers. La disposition des trous de sautage dans une galerie et dans les piliers d'une exploitation par chambres remblayées est présentée aux figures 22(a) et 22(b), respectivement.

Dans les galeries, les trous sont forés vers l'avant dans le front et obliquement dans les coins, à la ligne de la couronne. Parfois, les trous sont également forés obliquement dans les coins de la sole. Seule la partie inférieure des trous est chargée d'explosifs. On fait détoner les trous de libération des contraintes avant le sautage principal. On vise ainsi à créer une zone fracturée pour faciliter la progression de la galerie. Les parements et l'arrière sont soutenus avec des boulons et un grillage métallique.

Au-delà de 2 000 m de profondeur, des coups de toit ont été signalés dans les piliers au cours de l'extraction de la sole dans les chantiers exploités par tranches remblayées. Le rapport largeur-hauteur des piliers était habituellement égal à 1 et ceux-ci n'avaient pas encore cédé à cette étape. Le plan de libération montré à la figure 22(b) consistait à libérer les contraintes à la fois dans les piliers et le front des chantiers. Même si cette opération n'a pas empêché les coups de toit de se produire, elle a réduit leur intensité et a contribué à ce que la plupart des coups de toit soient déclenchés peu de temps après le sautage.

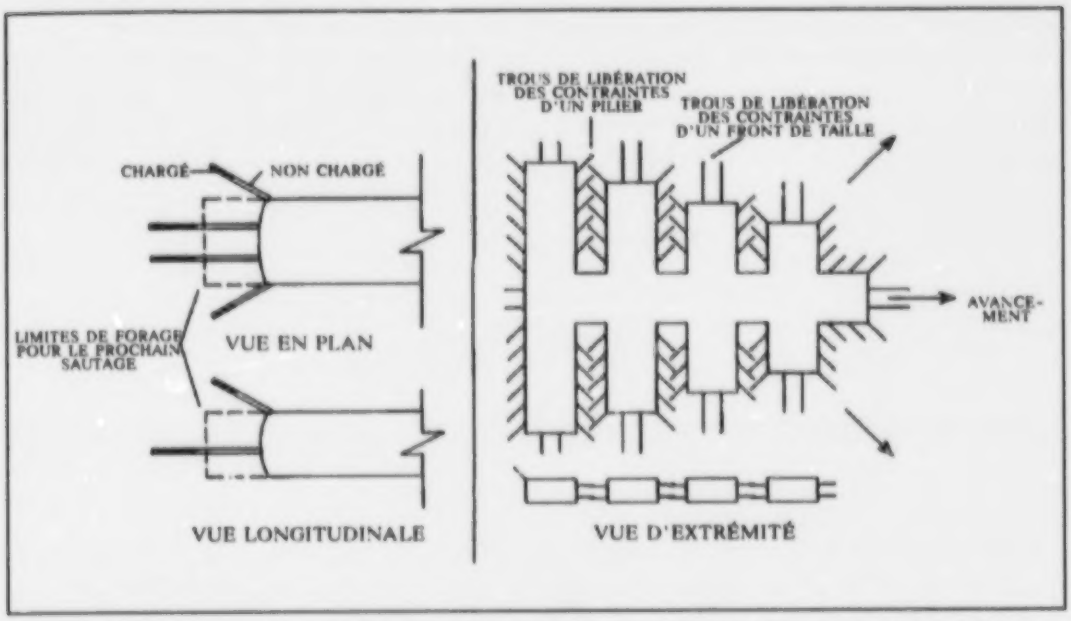



Figure 22 – Disposition des trous de libération des contraintes dans les galeries et piliers (Mine Creighton)

On a établi que les stots dans les chantiers exploités par tranches remblayées étaient la principale cause des coups de toit dans les mines souterraines profondes. C'est pourquoi on a élaboré des techniques de dépilage en forme de V renversé. Les coups de toit ont été ainsi limités au chantier sommital. Ayant abandonné l'exploitation par tranches remblayées pour une exploitation verticale rabattante au–dessous du niveau 6 600, on a décidé de créer une fente de libération des contraintes à travers le massif minéralisé dans le stot. L'objectif visé était de redistribuer les contraintes dans le stot et de modifier l'énergie potentielle dans le massif rocheux au début du cycle d'abattage plutôt qu'à la fin. La figure 23 montre une vue en perspective des chantiers au–dessus et au–dessous du stot sur le niveau 6 600. La fente de libération des contraintes a été sautée par étapes et remblayée après chacune des étapes. Des milliers d'événements microsismiques ont été enregistrés au cours de l'abattage de la fente, en général dans les deux heures suivant le sautage. L'exploitation verticale rabattante s'est poursuivie dans le stot qui n'a pas été l'objet de fortes contraintes.

La plupart des événements sismiques de magnitude supérieure à 3,0 dans la mine Creighton se produisent dans les parements éloignés des zones d'exploitation. Cette découverte a conduit à une évaluation systématique des structures géologiques en profondeur. La figure 24 indique l'emplacement des zones de cisaillement dominantes sur le niveau 6 600. Toutes les zones de cisaillement sont sismiquement actives, certaines n'étant soumises qu'à une activité microsismique et d'autres à des événements sismiques de forte magnitude.

Dans le cadre du projet sur les coups de toit, le Centre de géomécanique de l'université Laurentienne se penche sur les propriétés des matériaux en zone cisaillée.

Le massif minéralisé de la mine Copper Cliff North mesure de 8 à 24 m de largeur, a un pendage abrupt et est de forme tabulaire. L'exploitation est effectuée selon la méthode verticale rabattante : des chambres de 12 m de largeur alternant avec des piliers de 24 m de largeur. Actuellement, l'extraction est concentrée entre les niveaux 3 600 et 3 935 comme l'indique le schéma de la figure 25.

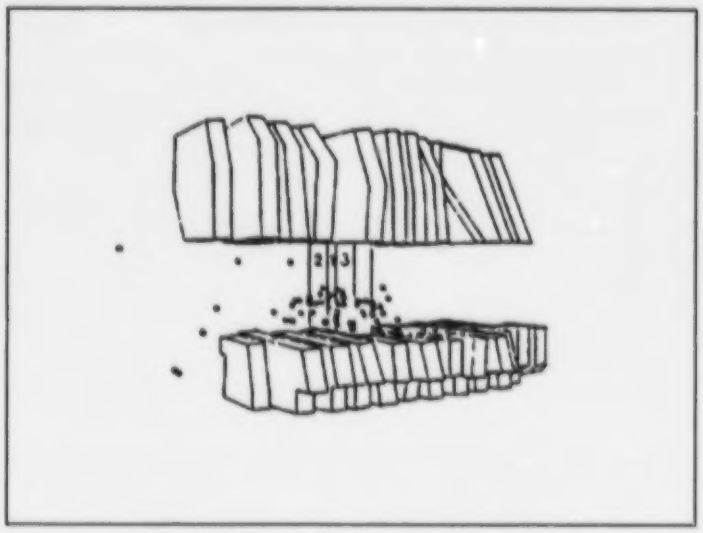


Figure 23 – Fente de libération des contraintes dans un stot au-dessous du niveau 6 600 à la mine Creighton et points de localisation de l'activité sismique

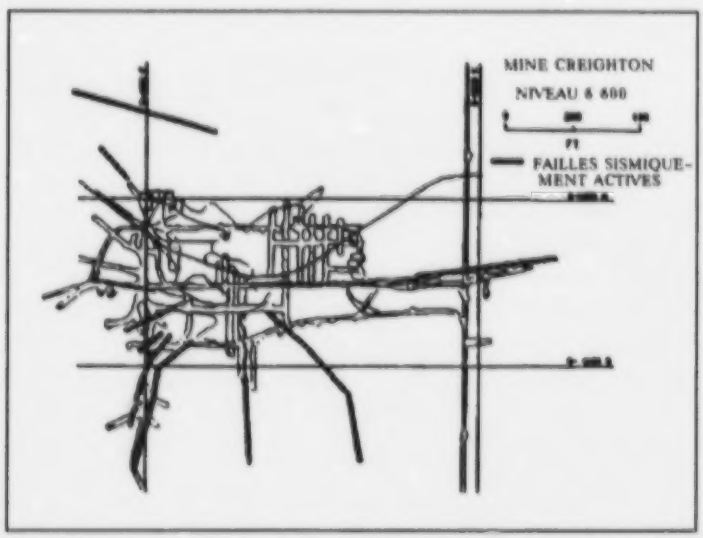



Figure 24 – Localisation des zones faillées sismiquement actives à la mine Creighton

Avant 1986, lorsque l'exploitation était réalisée dans presque tous les chantiers primaires, le contrôle des terrains ne causait aucun problème. Cependant, comme il y a eu des problèmes opérationnels de remblayage, plusieurs chantiers n'ont pas été remblayés. L'activité sismique et les coups de toit ont commencé à se manifester au cours de l'abattage du chantier 113 à l'extrême sud du gîte.

Après le sautage d'un stot qui a produit des secousses de magnitude 3,1, quatre coups de toit de magnitude variant entre 2,2 à 2,9 se sont produits en moins d'une heure. L'accès à la sole du niveau 3 835 a été endommagé. L'abattage subséquent dans le chantier 113 a causé des dommages supplémentaires à cet accès ainsi qu'à l'accès des niveaux 3 600 et 3 935. En se basant sur

l'emplacement des coups de toit et des événements sismiques, on a conclu que le pilier 114 adjacent avait été violemment fracturé. L'abattage du pilier a produit d'autres coups de toit et des éboulements. On a localisé 23 événements au total de magnitude d'au moins 2,0 dans ces niveaux et leur voisinage. Contrairement à la mine Creighton, ces événements n'ont pas été assujettis à des éléments structuraux.

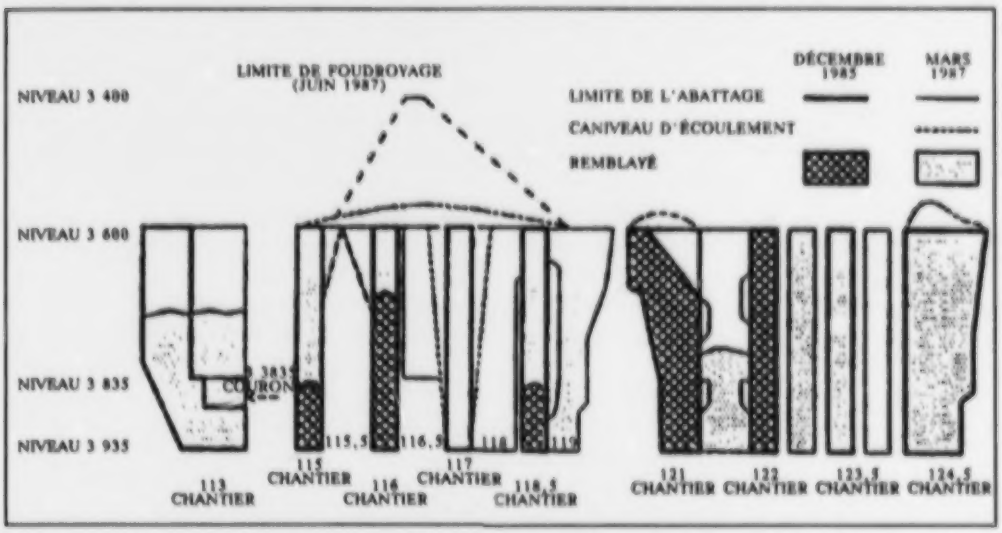



Figure 25 – Coupe longitudinale de la mine Copper Cliff North montrant les chambres abattues et remblayées (d'après Morrison, 1990)

## Bibliographie

Udd, J.E.; A proposal for a major research project on rockbursts; Rapport de division MRP/MRL84-84(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1984.

Brehaut, C.H. et Hedley, D.G.F.; Rapport annuel 1985-1986 du Projet de recherche conjoint Canada-Ontario-industrie sur les coups de toit; CANMET Rapport spécial SP86-3F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1986.

Makuck, A.; Conception d'un nouveau système de surveillance macrosismique; CANMET Rapport spécial SP86-14F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1986.

Niewiadomski, J.; Techniques de localisation des foyers fondées sur l'arrivée des ondes P; CANMET Rapport spécial SP86-15F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1986.

Hedley, D.G.F.; Condition of the hanging wall above the rockburst area at Quirke Mine; Rapport de division M&ET/MRL86-155(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1986.

Udd, J.E. et Hedley, D.G.F.; Rockburst research in Canada - 1987; Rapport de division MRL87-1(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Arjang, B. et Nemcsok, G.; Review of rockburst incidents at the Macassa Mine, Kirkland Lake; Rapport de division MRL87-21(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Hanson, D.S.G.; Calibration of the NFOLD displacement discontinuity model of the "A" zone at Campbell Red Lake Mine; Rapport de division MRL87-36(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Hedley, D.G.F.; Coups de toit dans les mines ontariennes en 1985; CANMET Rapport spécial SP87-2F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Hedley, D.G.F.; Catalogue of rockburst literature; Rapport de division MRL87-50(LS); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Hedley, D.G.F.; Rockburst mechanics; Rapport de division MRL87-118(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Makuch, A., Neumann, M., Hedley, D.G.F. et Blake, W.; Tirs de mine pour relaxation des contraintes dans la mine Campbell Red Lake; Partie I - Principes de la mécanique des roches appliqués à la relaxation des contraintes subies par les piliers; Partie II - Applications pratiques de la relaxation des contraintes subies par les piliers dans la mine Campbell; Partie III - Tirs de mine observés par des instruments, effectués pour relaxer les contraintes dans les piliers de couronne 1 604E; Rapport spécial SP87-8F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Hanson, D.S.G., Quesnel, W. et Hong, R.; Destressing a rockburst-prone crown pillar at Macassa Mine; Rapport de division MRL87-82(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Newmann, M., Makuch, A., Hedley, D.G.F. et Blake, W.; Practical applications of pillar destressing at Campbell Red Lake Mine; 8th CIM Underground Operator's Conference, Elliot Lake, Ontario, février 1987.

Le Bell, G.R., Quesnel, W.T.F. et Glover, W.; An analysis of rockburst events during sinking of Macassa No. 3 shaft; Réunion générale annuelle, ICM, Toronto, mai 1987.

Morrison, D.M.; Rockburst research at Falconbridge Limited; Réunion générale annuelle, ICM, Toronto, mai 1987.

Brehaut, C.H. et Hedley, D.G.F.; Rapport annuel 1986–1987 du Projet de recherche conjoint Canada–Ontario–industrie sur les coups de toit; CANMET Rapport spécial SP87–7F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Davidge, G.R.; Rockburst research at Falconbridge Limited; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Hanson, D.S.G., Rochon, P. et Semadeni, T.J.; Seismic monitoring systems being used in the Canada–Ontario–Industry Rockburst Project; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Hedley, D.G.F. et Udd, J.E.; The Canada–Ontario–Industry Rockburst Project; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par les coups de toit, Montréal, août 1987.

Hedley, D.G.F.; Rockburst; Proc. Seminar CANMET, Partner with the Quebec Mining Industry, Val d'Or, Québec, p. 94–117, février 1988. Rapport de division MRL87–160(OP); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

MacDonald, P. et Cochrane, L.B.; Research related to mining induced seismicity at Inco Limited; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Makuch, T.; Rock mechanics at Campbell Red Lake Mine; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Niewiadomski, J.; Source location techniques for seismic activity in mines; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Oliver, P., Wiles, T., MacDonald, P. et O'Donnell, D.; Rockburst control measures at Inco's Creighton Mine; Proc. 6th Conf. on Ground Control in Mining West Virginia, 1987.

Quesnel, W.J.F. et Hong, R.; Mining induced seismicity: monitoring et interpretation, Lac Minerals Ltd., Macassa Division; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Rochon, P. et Hedley, D.G.F.; Magnitude scaling of seismic events at Elliot Lake; Rapport de division MRL87–157(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1987.

Udd, J.E. et Hedley, D.G.F.; Rockburst research in Canada – 1987; Proc. 6th Int. Rock Mech. Congr., Vol. 2, p. 1 283–1 288, Montréal, septembre 1987.

Bharti, S.; Safe and productive mining at depth – a strategic approach developed by Falconbridge; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Cochrane, L.B.; Control of structural geology on rock mass failures; Seminar Rock Mass Failure in Hardrock Mining, Université Laurentienne, Sudbury, Ontario, juin 1988.

Davidge, G.R., Martin, T.A. et Steed, C.M.; Lacing support trial at Falconbridge Ltd., Strathcona Mine; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Hedley, D.G.F.; Historical review of rockbursts in Ontario mines; Rapport de division MRL88-28(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1988.

Hedley, D.G.F.; Peak particle velocity for rockbursts in some Ontario mines; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

MacDonald, P., Wiles, T. et Villeneuve, T.; Rock mechanics aspects of vertical retreat mining at 2000 m depth at Creighton Mine; CARE, University of Newcastle-upon-Tyne, publié par l'IMM, Londres, 1988.

Makuch, T. et Blake, W.; Practical application of rock mechanics and mine planning for rockburst control at Campbell Red Lake Mine; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Morrison, D.M.; Instabilities induced by fault slip mechanisms; Seminar Rock Mass Failure in Hardrock Mining, Université Laurentienne, Sudbury (Ontario), juin 1988.

Morrison, D.M. et MacDonald, P.; Causes of rockbursts in Inco Mines; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Plouffe, M., Cajka, M.G., Wetmiller, R.J. et Andrew, M.D.; The Sudbury local telemetered seismograph network; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Semadeni, T.J., Rochon, P. et Niewiadomski, J.; Waveform analysis of mine-induced seismic events recorded at Rio Algom's Quirke Mine; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Wetmiller, R.J., Plouffe, M., Cajka, M.G. et Hasegawa, H.S.; Investigation of natural and mining-related seismic activity in Northern Ontario; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Wiles, T. et MacDonald, P.; Correlation of modelling results with visual and microseismic monitoring at Creighton Mine; Computers and Geotechnics, Vol. 5, No. 2, p. 105-122; 1988.

Labuc, V. et Momoh, O.A.; The CANMET-Noranda seismic monitoring system using fibre optic signal transmission; Atelier sur les secousses sismiques provoquées par l'exploitation minière, Montréal, août 1987.

Labuc, V., Bawden, W. et Kitzinger, F.; Seismic monitoring using fibre optic signal transmission; Proc. 6th Int. Rock Mech. Congr., Vol. 2, p. 1051-1056, Montréal, septembre 1987.

Semadeni, T.J. et Calder, P.N.; High frequency microseismic monitoring applied to the determination of stress levels in hard rock mines; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Tabebi, S. et Young, R.P.; Characterizing microseismicity associated with stope development; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juin 1988.

Young, R.P., Hutchins, D.A. et McGaughey, W.J.; Seismic imaging ahead of mining in rockburst prone ground; Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, juillet 1988.

Hedley, D.G.F.; A rockburst primer; The Northern Miner Magazine, Vol. 3, No. 7, p. 32–37, juillet 1988.

Hedley, D.G.F.; Evaluation of support systems subject to rockburst; Rapport de division M&ET/MRL88–108(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1988.

Brehaut, C.H. et Hedley, D.G.F.; Rapport annuel 1987–1988 du projet de recherche conjoint Canada–Ontario–industrie; CANMET Rapport spécial SP88–22F, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1989.

Udd, J.E. et Hedley, D.G.F.; A proposal for the continuation of the Canada–Ontario–Industry Rockburst Research Project; Rapport de division MRL89–15(TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1989.

Quesnel, W.J.F., de Ruiter, H. et Pervik, A.; The assessment of cemented rockfill for regional and local support in a rockburst environment; Lac Minerals Ltd., Macassa Division, 1989. Conference Mining with Backfill – Innovation in Mining Backfill Technology, Montréal, octobre 1989.

Morrison, D.M. et Galbraith, J.E.; A case history of Inco's Copper Cliff North Mine; Proc. 31st U.S. Symp. Rock Mech., Colorado, juin 1990.

## Comité de gestion du projet sur les coups de toit

C.H. Brehaut – Placer Dome Inc., Président
C. Barsotti, Inco Limitée
M. Musson, Falconbridge Limitée
P.V. Kivisto, Ministère du Travail de l'Ontario
J.B. Gammon, Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario
M.D. Everell, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada
J.E. Udd, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada

## Comité technique du projet sur les coups de toit

D.G.F. Hedley, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Président
P. Rochon, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Secrétaire
D. Ames, Ministère du travail de l'Ontario
W. Bromell, Falconbridge Limitée
C. Graham, Direction de la recherche minière de l'Ontario
A. Makuch, Placer Dome Inc.
D.M. Morrison, Inco Limitée
S.N. Muppalaneni, Rio Algom Limitée
W.J.K. Quesnel, Lac Minerals Ltd.
P. Townsend, Denison Mines Limited

## Autres membres du personnel participant au projet

### Comité technique

S. Bharti
P. Campbell
P. Kaiser
M. Kat
W. Logan
P. MacDonald
M. Neumann
A. Sheikh
G. Swan

### CANMET

B. Arjang
Z. Chen
D. Hanson
S. Lapointe
W. McNeil
J. Niewiadomski
M. Plouffe
T. Semadeni